

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Studium topografie povrchu vytvořených
laserovým dělením**

**Study of Surface Topography Created by Laser
Cutting**

Student:

Jiří Opěla, SB3STC02

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.

OSTRAVA 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Opěla

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Studium topografie povrchů vytvořených laserovým dělením
Study of Surface Topography Created by Laser Cutting

Zásady pro vypracování:

1. Prostudovat základní literaturu a provést literární rešerši.
2. Studium základů technologie laserového dělení se zaměřením na lasery.
3. Současné metody hodnocení topografie povrchu.
4. Analýza a interpretace dat získaných z topografie povrchů u vybraných vzorků materiálů.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989.
- [2] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.
- [3] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1997.
- [4] MLČOCH, L.; SLIMÁK, I. *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL, 1987.
- [5] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*, Viena Košice, 2000, s. 275, ISBN 80-7099-430-4.

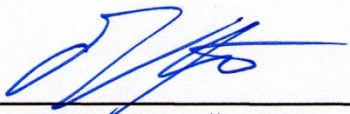
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.


Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....*21. 5. 2012*.....

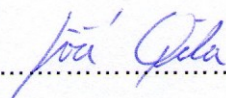
.....*Jiří Gála*.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....21.5.2012.....

..........

podpis

Jiří Opěla

Sportovní 446, Suchdol nad Odrou 74201

Poděkování:

Děkuji mé rodině za podporu, kterou mi po dobu studia dávala, a především bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Valíčkovi Ph.D. za obrovskou trpělivost, spolupráci, připomínky a cenné rady při vedení práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÍCE

OPĚLA, Jiří. Studium topografie povrchu vytvořených laserovým dělením. Ostrava, 2012. 51 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní. Vedoucí práce VALÍČEK Jan.

Bakalářská práce se věnuje studiu o technologii laseru a laserového dělení materiálů, a obsahuje popis laseru a jeho principu, rozdělení jednotlivých typů laserů a druhů dělení laserem. Jsou stručně uvedeny a popsány jednotlivé možnosti měření a zjišťování topografie povrchu materiálu. V experimentální části je uveden postup přípravy vzorků, analýza a vyhodnocení topografie povrchu vytvořeného touto nekonvenční metodou.

ANNOTATION OF BACHELOR'S WORK

OPĚLA, Jiří. Study of Surface Topography Created by Laser Cutting. Ostrava, 2011. 51 p. Bachelor's Work. VŠB – Technical University of Ostrava, Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering, Tutor VALÍČEK Jan.

Bachelor's work is devoted to the study of laser technology and laser cutting of materials and contains a description of a laser and its principle, classification of the different types of lasers, and different types of laser cutting. There is a brief description of different types of measuring and detecting a surface topography. In the experimental part, it is described a procedure of preparation of samples, an analysis and surface topography evaluation after being machined by this unconventional method.

Obsah

Seznam použitého značení	8
Seznam použitých symbolů	9
1. Úvod	10
2. Cíl bakalářské práce	11
3. Laserové řezání.....	12
3.1 Historie laseru a laserového řezání	12
3.2 Současný stav	13
3.3 Popis laserového řezání	14
3.4 Využití laseru	16
3.5 Konstrukce laseru	17
3.5.1 Princip laseru	17
3.5.1 Konstrukce laserového zařízení	18
3.6 Rozdělení laserů	20
3.6.1 Pevnolátkové lasery	20
3.6.2 Kapalinové lasery	21
3.6.3 Plynové lasery	21
3.7 Technologické parametry při řezání laserem.....	25
3.7.1 Charakteristika technologických parametrů	26
3.7.2 Rozdělení typů laserového řezání	27
4. Rozdělení současných metod měření topografie povrchu	28
4.1 Dotykové metody	28
4.2 Optické metody	30
4.3 Jiné metody	31
4.4 Hodnocení topografie povrchu	32
5. Experimentální část.....	35
5.1 Příprava vzorků	35
5.2 Vlastnosti a informace o materiálu vzorků	36
5.3 Popis měření	38
5.4 Analýza naměřených hodnot	38
5.4.1 Tloušťka materiálu 5 milimetrů	39
5.4.2 Tloušťka materiálu 8 milimetrů	42
5.4.3 Tloušťka materiálu 10 milimetrů	45
5.5 Vyhodnocení a diskuze výsledků	48
6. Závěr.....	49
Seznam použité literatury	50

Seznam použitého značení

LASER	zesilování světla pomocí stimulované emise záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
MASER	zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
PVC	polyvinylchlorid
UV	ultrafialové záření (ultraviolet)
IR	infračervené záření (infrared)
RTG	radioizotopový termoelektrický generátor (radioisotope thermoelectric generator)
SEM	rastrovací elektronový mikroskop (scanning electron microscope)
MFM	magnetický silový mikroskop (magnetic force microscopes)

Seznam použitých symbolů

l_p	-	měřená délka	[mm]
p	-	tlak řezného plynu	[MPa]
λ	-	vlnová délka	[μm]
P	-	výkon	[W]
A	-	absorpce	[%]
R	-	reflexe	[%]
R_a	-	střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
R_z	-	největší výška nerovnosti profilu	[μm]
R_q	-	střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
R_v	-	největší výška prohlubně profilu	[μm]
R_p	-	největší výška výstupku profilu	[μm]
Z_p	-	výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky l_p	[μm]
Z_v	-	hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky	[μm]
R_{ku}	-	špičatost posuzovaného profilu	[MPa]
R_e	-	mez kluzu	[MPa]
KV	-	minimální nárazová práce	[J]
h	-	tloušťka vzorku	[mm]
a	-	krok mezi měřenými liniemi	[mm]
v	-	rychlost laserového řezání	[mm/min]
E	-	modul pružnosti v tahu	[GPa]
R_m	-	pevnost v tahu	[MPa]

1. Úvod

Mezi dnešní základní snahy strojírenských firem patří zvyšování produktivity práce v oblasti výroby součástí, a tedy hlavně v obrábění materiálů. Díky vývoji v poslední době se uplatňují čím dál více nekonvenční metody obrábění. Mezi tyto metody patří obrábění laserovým paprskem. Jeho využití ve strojírenství je velmi široké a neustále přibývají další možnosti jeho uplatnění. Základní využití laseru ve strojnictví je jeho použití pro dělení různých druhů materiálů. Dělení laserovým paprskem zabírá v současnosti velmi důležitou úlohu při obrábění materiálu a přípravě polotovaru. Laserové obrábění je široce rozšířené po celém světě, a toto postavení je dáno hlavně klesající cenou zařízení, rychlostí, kvalitou, výkonem a zároveň i ekologičností výroby.

Práce se věnuje studiu topografie povrchu řezu vytvořeného laserovým dělením. Ukazuje různé výsledky vyhodnocení topografie povrchu a způsoby jejich získávání. Ze získaných výsledků a dat je ukázána a popsána kvalita povrchu, vytvořeného laserovým dělením. Z porovnání těchto dat získaných řezáním při různých parametrech, získáme popis kvality řezu a výsledné vyhodnocení. Díky těmto výsledkům můžeme určit nejvhodnější řezné parametry pro obráběný materiál a zajistit jeho nejlepší konečnou kvalitu.

2. Cíl bakalářské práce

Laserový paprsek při řezání materiálu uvažujeme jako flexibilní řezný nástroj. Pro definování řezu laserovým paprskem je třeba důkladně analyzovat povrch řezu. Cílem bakalářské práce je měření, analýza a porovnávání dosažených drsností povrchů řezů vytvořených laserovým dělením při rozdílných technologických parametrech. Vyhodnocení výsledků a konečná analýza kvalit povrchů ve vztahu k příslušným technologickým parametrům.

K dosažení cíle je třeba provést:

1. Rešerše aktuálního stavu problematiky, popis vývoje, princip a konstrukce laseru a současný stav a parametry laserového dělení.
2. Metody měření a způsoby vyhodnocování topografie povrchu vytvořeného laserovým dělením.
3. Příprava vzorků a analýza experimentálně získaných dat.
4. Vyhodnocení vlivů technologických parametrů na topografii povrchu vytvořeného laserovým dělením a diskuze výsledků.

3. Laserové řezání

3.1 Historie laseru a laserového řezání:

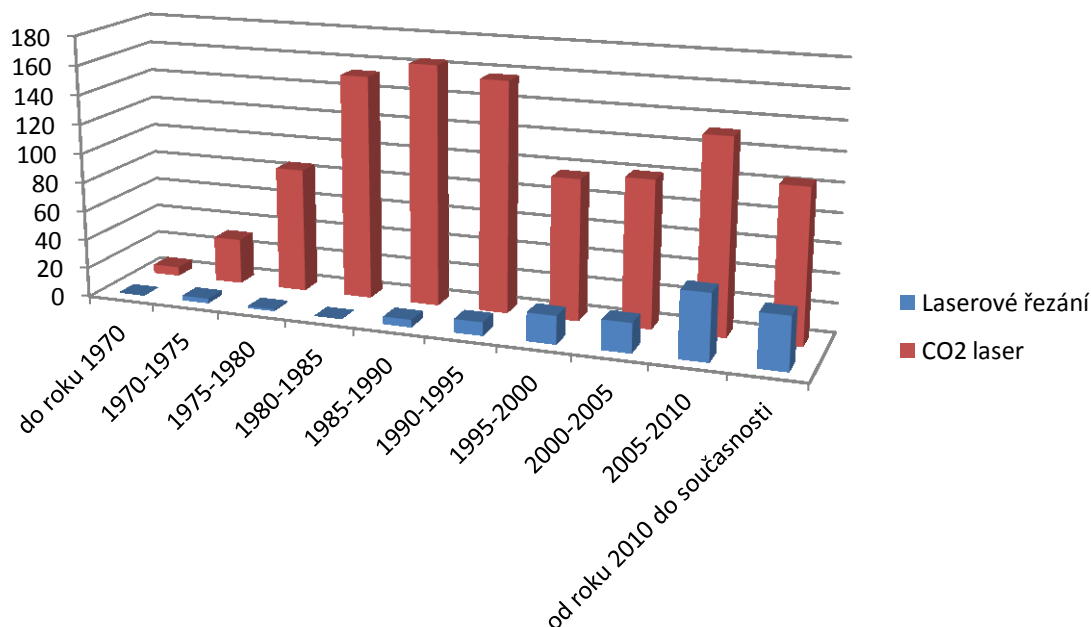
Vznik laseru (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu zesilování světla pomocí stimulované emise záření) se začíná psát v roce 1917, ve kterém Albert Einstein ukázal, že kromě jevů jako spontánní emise a absorpce existuje ještě další jev a to stimulovaná emise. Další krok, který vedl k vynálezu laseru, udělal ruský fyzik V. A. Fabrikant. V roce 1939 poukázal na možnost použití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Na konferenci o Radiospektroskopii, která se pořádala v roce 1952, moskevští fyzikové N. G. Basov a A. M. Prochorov referovali o molekulárním svazkovém generátoru, neboli MASERu, který pracoval se svazkem molekulárního čpavku. Vznikem maseru (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) se vytvořil i nový vědní obor – kvantová elektronika. N. G. Basov, A. M. Prochorov a C. H. Townes společně dostali v roce 1964 Nobelovou cenu za vynález maseru.

Mezi realizací prvního maseru a prvního laseru uplynulo šest let. O dva roky později N. G. Basov zvažoval využití polovodičových materiálů pro kvantové oscilátory a vytvořil optický rezonátor leštěnými planoparalelními stěnami na polovodičovém čipu. V. A. Fabrikant spolu s F. A. Butajevovou pozorovali zesílení optického záření v pokusu s elektrickým výbojem procházející směsí vodíku, rtuti a helia v témže roce. V roce 1958 vyslovili A. Schawlow, C. Townes a A. M. Prochorov nezávisle na sobě ideu, že v maseru užitý jev stimulované emise, může být použitý i v infračervené a optické oblasti spektra. Theodore Maiman v roce 1960 publikoval článek, popisující generování záření v rubínové tyči ve viditelné oblasti spektra, díky kterému byl vynaleznut rubínový laser. Ve stejném roce demonstrovali A. Javan, W. R. Bennet a D. R. Herriott laserovou akci ve směsi plynů helia a neonu. Od roku 1961 se vývoj různých typů laseru bouřlivě rozrůstal. První praktické využití laseru v průmyslu se odehrálo v roce 1966 ve firmě Epperson et. Al. z Western Electric Co. Firma používala rubínový laser k vrtání otvorů do diamantových kalibrů, což byla součást nástroje pro tažení drátů. O rok později v roce 1967 byl pak ve Velké Británii uveden do provozu laserový systém na řezání ocelových plechů s použitím kyslíku jako asistenčního plynu. Zanedlouho následovali systémy pro řezání nekovových materiálů. V sedmdesátých letech dvacátého století pak docházelo k masivnějšímu průmyslovému nasazení laserového řezání pomocí CO₂ laserů. Tyto systémy byly v dalších letech zdokonalovány. Od roku 1971 dochází k významnému rozvoji laserové technologie [1], [2].

3.2 Současný stav

V současnosti laser se široce uplatňuje v mnoha různých strojírenských oblastech. Jeho hlavní použití by se dalo rozdělit do dvou základních kapitol. První je měření a kontrola vyrobených součástí a hotových obrobků. Měřicí systémy v metrologii využívají především pro přesnost a rychlost snímání a pro vysoké rozlišení měřeného povrchu. Využívá se také pro nedestruktivní metody zkoušení součástí. Druhou hlavní skupinou jsou aplikace jako povlakování, gravírování, tepelné zpracování povrchu, svařování a navařování, povrchové natavování, vrtání a především řezání [2].

Problematikou laserového řezání se na rozdíl od laserových systémů nebo konkrétních typů laseru mnoho autorů nezabývá, i když v poslední době se přece jen počet prací na tématu laserového řezání zvětšuje a stává se z něj aktuální téma, jak dokazuje obr. 1. Jedná se o počty publikací, které se nachází na databázi SpringerLink.



Obr. 1 - Přehled počtu zveřejněných publikací zaměřených na laserové řezání a CO₂ laser ze zdroje SpringerLink

3.3 Popis laserového řezání

Dnes je hlavní využití laseru pro řezání materiálů. Laserové řezání materiálu je technologie tepelného dělení materiálu, kterou je již dnes díky masivnímu rozšíření možné nazvat slovem standardní.

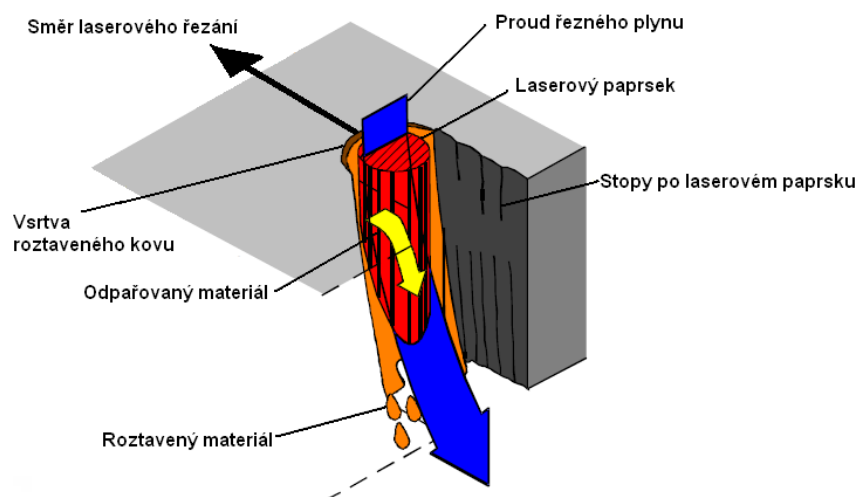
Z technologického hlediska můžeme rozdělit dvě metody laserového řezání:

- Řezání a dělení materiálů pro plechy a jiné tenké materiály
- Tvoření drážky u křehkých materiálů (sklo, keramika) a poté její kontrolovaný lom

Pro řezání se nejčastěji používají CO₂ lasery. Při laserovém řezání je snahou odpařit materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. Nejpoužívanější lasery v tomto oboru jsou kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 15 kW. Ve většině průmyslových aplikací se přivádí současně s laserovým svazkem proud plynu na místo řezání. Pro řezání kovů se přivádějí reaktivní plyny jako např. kyslík. Díky tomu dochází k exotermické reakci, která urychluje celý proces řezání. Takto jsou řezány materiály jako nízkouhlíkové oceli a nerezové oceli. Princip laserového řezání je na obr. 2.

U dělení ocelí se přednostně užívají CO₂ lasery, jejichž hospodárnost je nejvyšší u řezání ocelí tloušťek 6 až 7 milimetrů, avšak běžně se dělí ocele až do tloušťky 25 milimetrů. Nejlepší kvalitu řezu mají plechy o malé tloušťce, na kterých nejsou zanechány stopy okují. Je třeba také rozlišovat u ocelových materiálů její druh, historii zpracování a dodatečné povrchové úpravy.

Řezný proces probíhá na základě vzájemného působení laserového paprsku, technologického plynu a řezaného materiálu. Oblast, ve které k těmto účinkům dochází, je ohraničena řeznou spárkou ve směru řezu a nazývá se čelem řezu. Při dopadu paprsku, na materiál se část paprsku odrazí, část se absorbuje a část projde materiálem. Pásmo, které absorbovaný laserový paprsek ohřívá až na teplotu tání, se v důsledku exotermické reakce s proudícím kyslíkem ještě dále otepluje až k teplotě vznícení. Následuje silné odpařování materiálu, které vede k jeho odvodu. Současné mechanické působení proudu řezného plynu unáší částice tekutého materiálu mimo prostor řezu. Roztavené pásmo se pohybuje ve směru řezu a proces natavování se neustále opakuje. Laserový paprsek v případě kontinuálního řezání tedy stabilně postupuje a představuje vlastní "řezný" nástroj [2].



Obr. 2 - Princip laserového řezání kovů [3]

Dělení neželezných kovů je méně efektivní než u ocelí a také rychlost řezání je nižší z důvodu vyšší tepelné vodivosti vyšší reflexe. Tyto kovy navíc mívají silný sklon k oxidaci a vyžadují někdy vakuum, nebo se jako ochranný přídavný plyn používá argon. Pouze titan reaguje podobně jako ocele a může být řezaný s podobnou účinností při použití argonu, jako přídavného plynu o vysokém tlaku p až 1 MPa.

Při řezání nekovových materiálů, jako keramika, plasty, sklo, papír, je na místo řezu přiváděn inertní plyn, který odstraňuje roztavený a odpařený materiál. Kromě kyslíku a inertních plynů se používá také dusík u dělení PVC a textilu, který ochraňuje řezné plochy před spálením a vznícením. Řezání nekovových materiálů můžeme rozdělit do tří řezných mechanismů [2]:

- Nařezání a následný stříh materiálů, používaný u keramiky a termoplastů.
- Odpařením, natavením a dalším následným odpařením materiálu vzniká kvalitní řez. Dochází k změně fáze materiálu z pevného přes kapalné až do odpaření. U materiálů jako je plexisklo apod.
- Chemickou degradací, laserový paprsek láme chemické vazby a ruší integritu materiálu. Užívá se u kompozitních materiálů, dále u dřeva PVC.

3.4 Využití laseru

Dalšími oblastmi, kde se laser v průmyslu kromě řezání v současnosti užívá, jsou [1], [2]:

- Zpracování plechů: svařování, vrtání
- Obrábění: Řezání drážek, obrábění dutin, složitých tvarů, odhroťování, vrtání dělení třísek
- Tepelné zpracování: Kalení, žhání, popouštění, zpevnění s natavením, rázové zpevnění
- Povrchové úpravy: Nanášení různých druhů povlaků a sycení povrchu legujícími prvky, leštění povrchu, vytváření textur
- Renovace opotřebovaných součástí: Navařování
- Měření délek, tvaru, polohy, měření jakosti povrchu
- Analýza chemického složení materiálu
- Dálkové řízení strojů
- Měření stavu opotřebení činné části nástroje
- Vyvažování součástí: Úběr materiálu v předem daném místě součásti
- Vytváření dekorací na a ve skelných předmětech

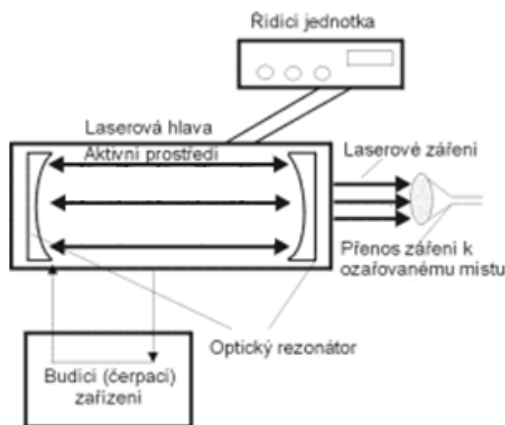
3.5 Konstrukce laseru

3.5.1 Princip laseru

Laser funguje na principu interakci fotonu a elektronu. Nachází-li se někde elektron, do něhož vletí foton, elektron pohltí energii fotonu a excituje se na vyšší energetickou hladinu. Tento elektron na vyšší energetické hladině dlouho nezůstane (zhruba 10^{-8} s) a spontánní emisí se elektron přesune zpět na jeho základní energetickou hladinu a zároveň vyše foton o stejné energii pryč, avšak náhodným směrem. Narazí-li foton do elektronu, elektron se excituje na vyšší energetickou hladinu a spadne na metastabilní hladinu. Při tomto přesunu na metastabilní hladinu uvolní elektron opět foton, který odletí náhodným směrem pryč. Po příletu stimulujícího fotonu, který donutí všechny elektrony sestoupit zpět na základní hladinu a vypustit jeden foton. Všechny tyto fotony, včetně stimulujícího, se spojí v jednu vlnu s mnohem větší energií. Tím dojde k zesílení světla stimulovanou emisí záření. Tato vlna nemá zatím potřebný směr. Směr je stejný, jakým směrem letěl stimulující foton. Foton může letět v požadovaném směru laserového paprsku, ale může mířit i jiným směrem. Proto se v laseru nachází rezonátor. Rezonátor je soustava dvojice zrcadel, umístěných v ose proti sobě, z nichž je jedno vysoce odrazné až z 99,9% (totálně reflexní zrcadlo), druhé zrcadlo je polopropustné, sloužící k vyvedení energie z rezonátoru. Fotony letící mimo osu rezonátoru, mohou ihned vylétnout z laseru, nebo se párkrát odrazí mezi zrcadly a vyletí. Fotony letící v ose začnou neustále létat mezi zrcadly a nabíjet na sebe ostatní fotony. Špatně letící fotony neustále zanikají a rovnoběžně letící fotony se v aktivním prostředí udržují a stimulují další fotony, díky čemu, je jich čím dál více. Tento počet bude exponenciálně narůstat. Metastabilní hladina, slouží k tomu, aby se fotony rychle samovolně neuvolňovaly špatným směrem a počkaly, až je strhne další foton letící správným směrem. Jakmile se fotony zesílí na určitou úroveň, polopropustné zrcadlo ho vypustí ven a tím nám vznikne požadovaný paprsek, který je vypuštěn na námi určenou plochu o velmi malé velikosti. Díky velkému shromáždění energie a tepla na této malé ploše dochází k tavení materiálu. To celé probíhá v řádu několika milisekund [4], [5].

3.5.2 Konstrukce laserového zařízení

Každé laserové zařízení se skládá z hlavních a vedlejších částí. Z laserové hlavice, zdroje budicího zařízení a z rezonátoru. Jednoduché schéma laserového zařízení je na obr. 3. Další vedlejší laserové části jsou chladicí zařízení, řídicí jednotka a vedení laserového paprsku [1], [4], [6].



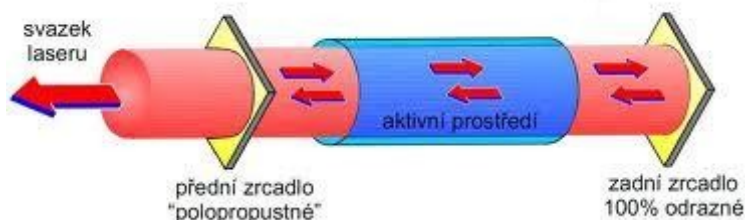
Obr. 3 - Hlavní části laseru [7]

Laserová hlavice

Laserová hlavice obsahuje aktivní látku (laserové medium), která je určující pro vlnovou délku záření. Aktivní látka je složena z materiálů, které mají vhodné energetické hladiny. Aktivní látku mohou představovat samostatné atomy, ionty, molekuly nebo jejich směsi. Dále polovodičové materiály a krystaly, kapaliny a skla, v plynném, kapalném nebo pevném skupenství. Materiál, ze kterého je složen obal, ve kterém je aktivní látka uzavřena musí splňovat schopnost odvádět vzniklé teplo a zároveň být průhledný. Základní dělení typů laseru je podle jejich aktivního prostředí.

V laserové hlavici se dále nachází rezonátor. Rezonátory se obecně dělí na dva typy. Na Fabryův-Perotův a optický rezonátor. Fabryův-Perotův rezonátor je optické zařízení tvořené dvěma plan-paralelními (rovnoběžnými) rovinnými částečně odraznými plochami. V laserové technice je častěji používají optické rezonátory otevřené. Optický rezonátor, zobrazený na obr. 4, je zařízení, které je schopné hromadit, nebo na jistou dobu udržet optické záření v omezené oblasti prostoru. Jde o soustavu dvojice zrcadel, umístěných v ose proti sobě, z nichž je jedno vysoce odrazné až z 99,9% (totálně reflexní zrcadlo), druhé zrcadlo je polopropustné, sloužící k vyvedení energie z rezonátoru. Optické rezonátory mohou být složeny z odrazných ploch různých tvarů. Příkladem odrazové plochy optického rezonátoru je například vnitřní plocha koule, nebo soustava zrcadel vymezující jistý konečný prostor jako vnitřek jehlanu, vnitřek kvádrů.

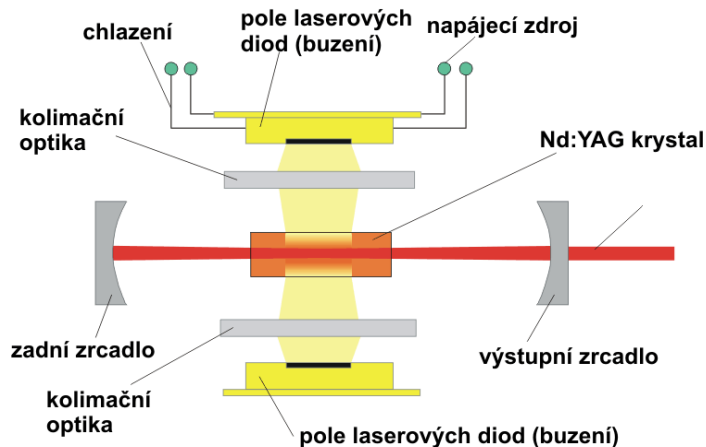
V žádném reálném rezonátoru ale není možné uchovat energii navždy, protože v praxi mají zrcadla konečné rozměry, proto dochází k úniku energie z prostoru kolem zrcadel. Prostor, kde dochází k soustředění energie, není uzavřen, proto rezonátor označujeme jako otevřený [1], [4].



Obr. 4 - Optický otevřený rezonátor [8]

Budící zařízení

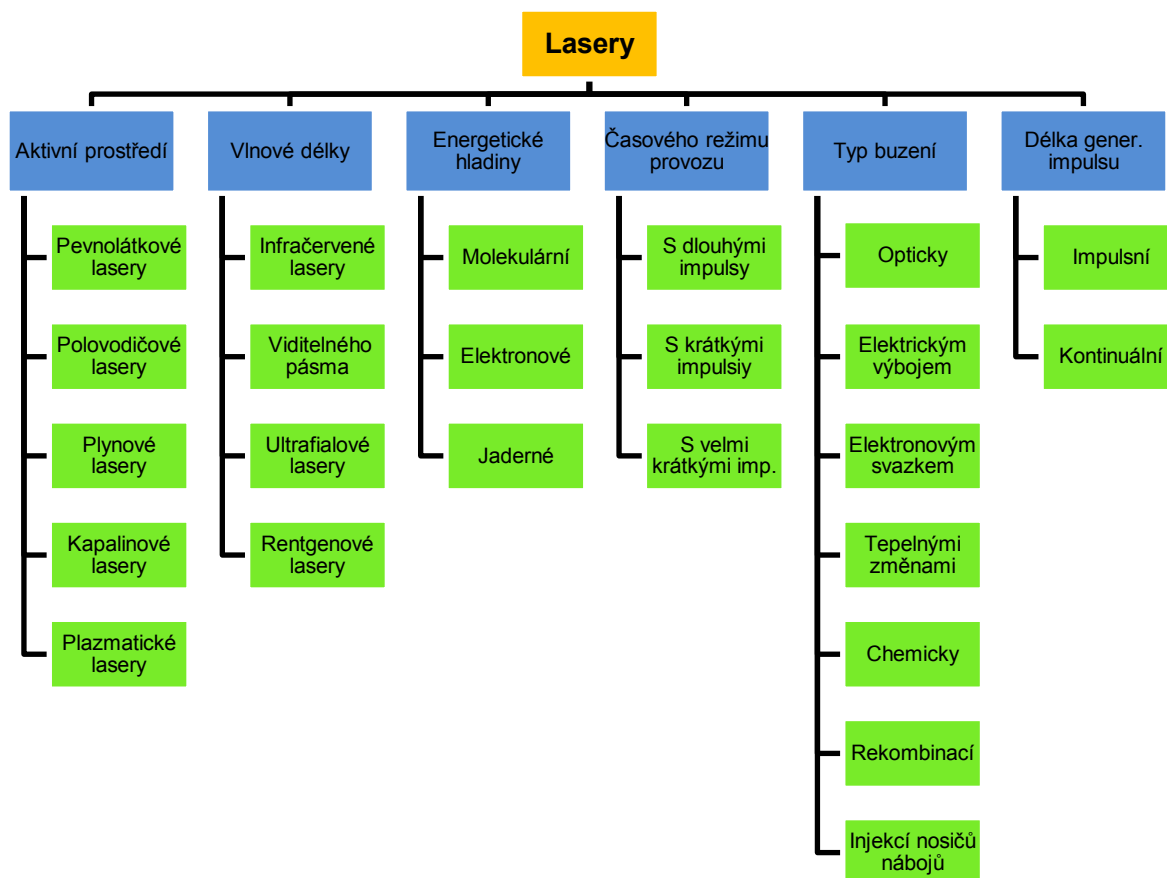
Budící zařízení dodává do aktivního prostředí excitační energii. Způsob buzení závisí na použitém aktivním prostředí. Buzení může být zajištěno optickým zářením (laserová dioda), elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, expanzí plynu, injekcí nosičů náboje a rekombinací těchto možností. Dodaná energie je pak různými procesy přeměněna na energii ionizační. Zdroje buzení mohou pracovat jak kontinuálně tak pulzně. Ukázka buzení Nd:YAG laseru laserovými diodami je na obr. 5 [9].



Obr. 5 - Laserovými diodami buzený Nd:YAG laser (boční buzení) [9]

3.6 Rozdělení laserů

Lasery se mohou dělit podle různých hledisek. Základní rozdělení je znázorněno na obr. 6. V tab. 1 jsou uvedeny některé typy laserů s jejich vlastnostmi. Nejzákladnější dělení je rozdělení podle aktivního prostředí [1], [4], [8].



Obr. 6 - Rozdělení laseru

3.6.1 Pevnolátkové lasery

Po objevu rubínového laseru, tj. laseru s aktivním materiálem $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$, bylo vyzkoušeno mnoho dalších aktivních přechodových prvků. Nejúspěšnějším se stal iont Nd v matici yttrium aluminium granátu – Nd:YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$). Pro dělení materiálu je velmi používán. Pevnolátkové lasery mají relativně stabilní aktivní materiál a jednoduchost systému. Pevnolátkový laser je laser, jehož aktivním prostředím je dielektrikum – pevná opticky propustná látka – matrice [1], [4], [8].

3.6.2 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Speciální kapaliny jsou zpravidla roztoky metalo-organických sloučenin, např. vodní roztoky solí s aktivními ionty Tb^{3+} , Nd^{3+} , Er^{3+} nebo Ho^{3+} . Ve většině případů se kapalinové lasery objevují s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy. Organická barviva tvoří velkou část aktivního prostředí kapalinových laserů. Aktivním prostředím jsou ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech, jakými jsou např. voda, etylalkohol, metylalkohol, toluen, benzen, aceton, glycerin a další [1], [4], [8].

3.6.3 Plynové lasery

Plynové lasery jsou lasery s aktivním prostředím v plynné fázi. Inverze populace hladin je vytvářena mezi energetickými hladinami některé ze složek plynu, tj. atomů (atomární lasery), iontů (iontové lasery), molekul (molekulární lasery). Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale zároveň byly vyvinuty i lasery s mimořádně vysokým výkonem pracujícím v impulsním provozu. Plynové lasery jsou buzeny mnoha různými metodami: elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky [1], [4], [8].

Atomární lasery

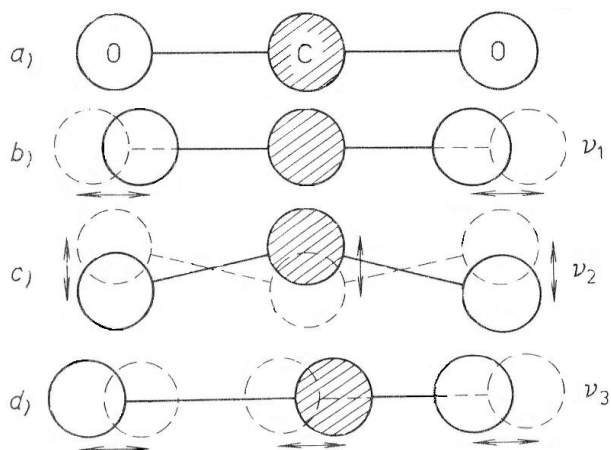
Aktivním prostředím jsou elektricky neutrální (v molekulách nevázané) atomy. Typickými představiteli atomárních laserů jsou helium-neonový laser, měděný laser a jodový laser.

Iontové lasery

Aktivní prostředí tvoří ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů. Ionty vzácných prvků bývají dvojmocné Ne^{2+} , Ar^{2+} , Kr^{2+} , Xe^{2+} . Společnými vlastnostmi iontových laserů jsou generace záření na několika různých vlnových délkách ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra a poměrně vysoké požadavky na prahový budící výkon.

Molekulární lasery

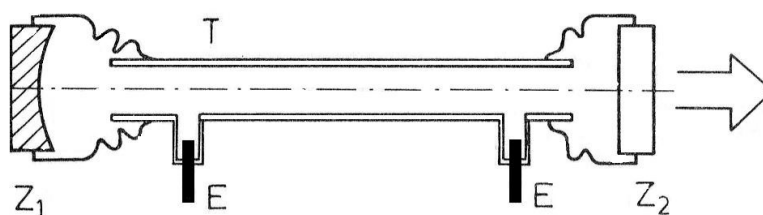
Příkladem laserů tohoto typu jsou vodíkový laser, dusíkový laser, CO laser a CO₂ laser. Tento je pro dělení materiálu jeden z nejpoužívanějších laserů. Aktivními molekulami jsou molekuly oxidu uhličitého. Ke stimulované emisi dochází při kvantových přechodech mezi různými vibračně- rotačními podhladinami základního elektronického stavu molekuly. Kmitavý (vibrační) pohyb atomů v molekule může být rozložen do tří nezávislých módů (viz obr. 7). Symetrického, ohybového a asymetrický módu. Rotační pohyb molekuly vede dále k rozštěpení každé vibrační energetické hladiny na řadu rotačních podhladin. Když je ustavena inverze populace mezi těmito podhladinami, dochází ke generaci záření s vlnovou délkou $\lambda=10,64 \mu\text{m}$. Tento přechod je nejsnáze dosažitelným. Méně častým bývá záření s vlnovou délkou přibližně $9,6 \mu\text{m}$.



Obr. 7 - Molekula CO₂ a její kmitavé body [1], kde:

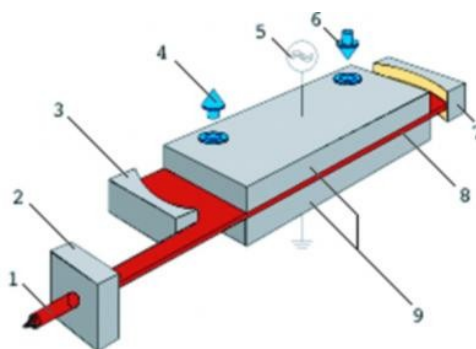
a) molekula, b) symetrický vibrační mód, c) ohybový mód, d) asymetrický mód

Excitace vibračních stavů molekul CO₂ se uskutečňuje nejčastěji v doutnavém elektrickém výboji, a to prostřednictvím nepružných srážek molekul CO₂ s elektrony nebo prostřednictvím rezonanční výměny excitační energie při nepružných srážkách s jinými molekulami. Elektrický výboj se zapaluje ve směsi plynů CO₂, N₂ a He. V klasickém konstrukčním uspořádání bývá základem CO₂ laseru výbojová trubice T (viz obr. 8) s vnitřním průměrem několika centimetrů naplněná směsí plynů CO₂, N₂, He při tlaku několik kPa. Podélný doutnavý výboj v trubici T (elektrický proud výbojem protéká podél osy výbojové trubice a podél optické osy rezonátoru) se udržuje vysokonapětovým zdrojem s proudovým omezením, který je připojen k elektrodám E.



Obr. 8 - Konstrukce výbojové trubice CO₂ laseru [1], kde:
 E – elektrody, T – výbojová trubice laseru, Z₁ – totálně reflexní zrcadlo,
 Z₂ – polopropustné zrcadlo

CO₂ lasery (princip na obr. 9) mají poměrně vysokou účinnost (až 40%), jsou široce využívané. Bylo vyvinuto a průmyslově se vyrábí mnoho variant CO₂ laserů. Vedle elektrického buzení existuje i řada systémů CO₂ laseru založených na jiných principech buzení, jako chemickou reakcí nebo rychlým ochlazením přehřátého plynu. Mezi nejznámější světové výrobce CO₂ laseru patří německý firma Trumpf, dále Coherent a Rofin [1], [4], [8], [9].



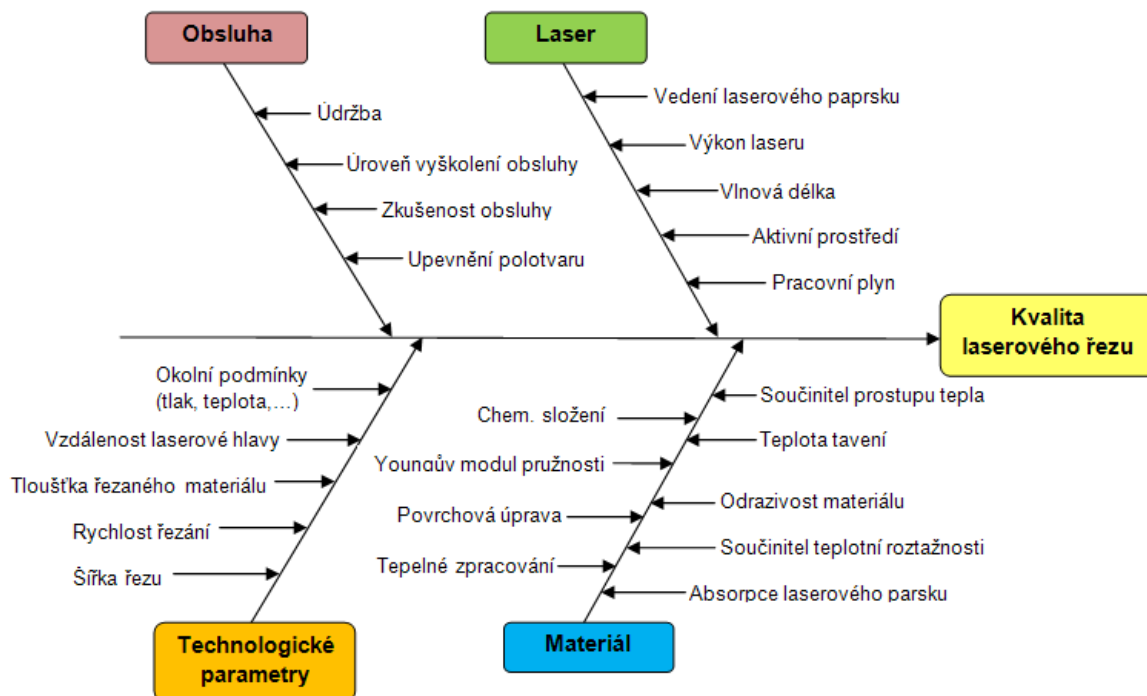
Obr. 9 - Princip CO₂ laseru [9], kde:
 1 – laserový paprsek, 2 – tvarování svazku, 3 – zrcadlo, 4 – vodní chlazení,
 5 – zdroj energie, 6 – vodní chlazení, 7 – zrcadlo, 8 – výboj, 9 – VF elektrody

Tabulka 1 - Porovnávací tabulka některých typů laseru [10]:

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Plynové – Atomární lasery				
He-Ne laser	He, Ne	543 nm, 633 nm	zelená, červená	Zaměřování polohy
Jódový laser	I	342 nm, 612 nm, 1315 nm	UV, IR	Věda, termojaderná syntéza
Plynové – Iontové lasery				
Argonový laser	Ar	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	Spektroskopie, oční lékařství
Hélium – kadmiový laser	He, Cd	325 nm, 442 nm	UV, modrá	
Plynové – Molekulární lasery				
CO ₂ laser	CO ₂	10,64 μm	IR	Svařování, řezání, obrábění, stomatologie
Excimerový laser	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 – 351 nm	UV	Fotolitografie, oční lékařství
Pevnolátkové lasery				
Rubínový laser	Al ₂ O ₃ :Cr ³⁺	694,3 nm	červená	Holografie, odstra- ňování tetování
Nd:YAD laser	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Nd ³⁺	1064,1 nm	IR	Strojírenství, litografie, chirurgie
Yb:YAG laser	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Yb ³⁺	1,029 μm	IR	Strojírenství, řezání
Alexandritový laser	Al ₂ BeO ₄ :Cr ³⁺	700 – 818 nm	červená, IR	Žihání, řezání

3.7 Technologické parametry při řezání laserem

Do výsledné kvality řezu, vzniklého laserovým dělením, promlouvá mnoho faktorů a parametrů, které můžeme zařadit do oblastí, s kterými souvisí, a to s laserem samotným, obsluhou, řezaným materiálem a technologickými parametry při řezání (viz obr. 10). Výběr a vlastnosti těchto parametrů ovlivňují konečnou kvalitu řezu a tím celkovou produktivitu a velikost nákladů na výrobu.



Obr. 10 - Isikawův diagram pro laserové řezání

3.7.1 Charakteristika technologických parametrů

Při dělení materiálu pomocí laserového paprsku určují technologické parametry výslednou kvalitu řezu a povrchu řezané součásti. Pro dělení kovů se nejčastěji používají CO₂ lasery a lasery pevnolátkové Nd:YAG. Nejlepší kvalitu řezu mají plechy o malé tloušťce, na kterých nejsou zanechány stopy okují. U dělení laserem lze rozlišit dvě hlavní skupiny faktorů, které ovlivňují výsledný řez, a to přímé a nepřímé.

Nepřímé faktory

- Vlastnosti laserového paprsku (vlnová délka, výkon laseru)

Přímé faktory

- Šířka řezné drážky
- Řezná rychlost
- Řezný plyn a jeho tlak
- Tloušťka řezaného materiálu
- Vzdálenost a nastavení ohniska
- Průměr dýzy

Při interakci laserového paprsku s materiálem dochází k jejich vzájemné reakci a efektům, které závisí na materiálu a jeho vlastnostech a schopnosti reagovat na laserové záření. Tyto vlastnosti materiálu jsou [2]:

- Odrazivost povrchu – reflexe R – procentuální množství odraženého laserového paprsku od povrchu materiálu
- Pohlcování laserového paprsku materiálem – absorpce A – schopnost materiálu pohltit laserové záření, které ohřívá povrchovou vrstvu. Reflexe a absorpce jsou vzájemně propojené jevy, jak ukazuje vztah:

$$R + A = 100\% \quad (3.1)$$

3.7.2 Rozdělení typů laserového řezání

Tavné řezání

U tavného řezání se materiál nataví v řezné linii a je následně unášen od řezné linie pracovním plynem. Pracovní plyn může být inertní a v tomto případě je taven pouze z energie laserového paprsku. Řezná rychlost u této metody není tak vysoká a pohybuje se na nižší úrovni [11], [12].

Oxidační řezání

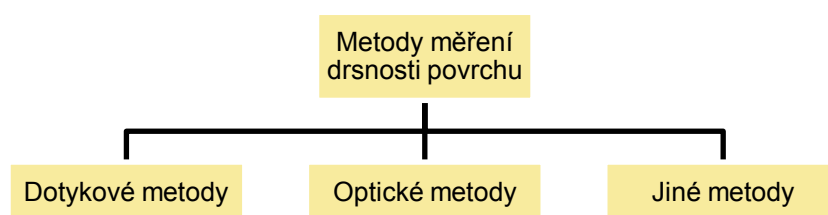
Jedná se o podobný způsob jako u tavného řezání ale používá se pracovní plyn s obsahem kyslíku, který reaguje exotermicky se základním materiálem, vzniká další energie, která zvyšuje účinnost procesu. Díky tomuto je rychlost řezání mnohem vyšší než u předchozí metody. Tento způsob řezání ale není vhodný pro přesné složité výrobky a malé otvory a vzniklý řez má i vyšší drsnost [11], [12].

Sublimační řezání

Princip této metody je v odpaření základního materiálu z řezné linie. K tomuto procesu se většinou používá pulzních laserů. S nimi se vede inertní plyn, který separuje odpařený materiál z řezné linie. Výhodou je velmi úzký a kvalitní řez ale naopak nevýhodou je vysoká energetická náročnost na odpaření měrného objemu. Proto se metoda používá méně a hlavně tam kde potřebujeme vysokou kvalitu řezu. Zároveň se tak neřežou materiály o velké tloušťce [11], [12].

4. Rozdělení současných metod měření topografie povrchu

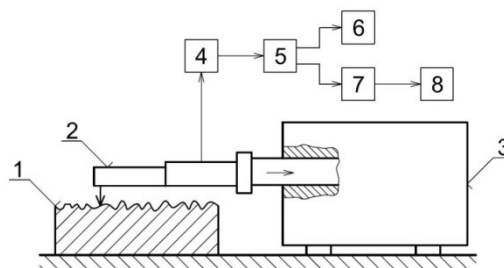
Pro hodnocení drsnosti povrchu ploch součástí výrobků byl vyvinut velký počet kontrolních metod a měřících přístrojů. Těmito přístroji můžeme měřit dvěma základními způsoby. Jeden způsob představuje porovnávání měřené součásti s etalony, jejichž drsnosti známe. Druhý způsob spočívá v přímém měření některé z veličin drsnosti pomocí dotkových či například optických měřících přístrojů, které ale vyžadují odbornou obsluhu a jejich cena je poměrně vysoká. Tento způsob měření lze rozdělit do velkého množství skupin a tříd. Nám postačí jednoduché dělení na tři základní skupiny (viz obr. 11). Kompletní rozdělení se nachází v literatuře [13], kde je i její stručnější popis.



Obr. 11 - Základní jednoduché rozdělení měření drsnosti a topografie povrchu [13]

4.1. Dotkové metody

Měření dotkovou metodou je v současnosti nejrozšířenější metodou. Patří do skupiny přístrojů s postupnou transformací profilu. Po měření povrchu se posouvá rovnoměrnou rychlostí měřící dotek, popřípadě se může posouvat měřený povrch pod dotykem. Změny výškové polohy měřícího hrotu, způsobené nerovnostmi povrchu se mnohonásobně zvětšují a zaznamenávají se ve tvaru profilografů, nebo u elektrických metod se převádějí na změny napětí nebo indukčnosti. Změny elektrického signálu umožňují snadné vyhodnocení libovolného počtu normovaných charakteristik drsností povrchu. Do této kategorie patří hlavně dotkové profilometry. Schéma měření dotkovým profilometrem je zobrazeno na obr. 12 [15]. Nevýhodou tohoto způsobu měření je, že měřící hrot způsobuje na měřeném povrchu deformaci po měření [13], [14].



Obr. 12 - Princip měření dotykovým profilometrem [15], kde:

1 – měřená součást, 2 – snímací hlavice s měřicím hrotem, 3 – posuvový mechanismus,
4 – zesilovač, 5 – filtr, 6 – registrační jednotka, 7 – jednotka zpracovávající signál,
8 – zobrazovací jednotka)

Výhody dotykových profilometrů:

- Přímé měření drsnosti povrchu
- Velmi vysoká rozlišovací schopnost
- Velké rozsahy rozlišení ve směru kolmém na plochu
- Možnost použití pro kalibraci výsledků získaných z nepřímých metod měření

Nevýhody dotykových profilometrů:

- Deformace povrchu způsobená měřicím hrotem
- Možnost měřit pouze ve 2D
- Neumožňuje průběžnou kontrolu povrchu a řídit kvalitu povrchu
- Relativně malá rychlost pohybu snímače po měřeném povrchu

Surftest SJ 401

Pro měření drsnosti a kontrolu vzorků byl použit měřicí přístroj Surftest SJ 401 (obr. 13) je přístroj pro měření drsnosti povrchu dotykovou metodou. Dokáže vyhodnocovat až 46 parametrů drsností v normách JIS, DIN, ISO a ANSIN a měřit i „vzhůru nohama“. Výstupní hodnoty dokáže zobrazovat na zabudovaném displeji nebo přímo také tisknout v tiskárně, jež je součástí přístroje. Výškové nastavení snímače je možné v rozsahu 10 milimetrů a posuv ve vzdálenosti od 0,1 do 25 milimetrů. Základní technické parametry měřicího přístroje jsou vypsány v tab. 2 [16], [17], [18].

Tabulka 2 - Vybrané technické parametry měřicího přístroje Surftest SJ 401

Měřicí rozsah	v ose X [mm]	25
	v ose Y [mm]	800
Měřicí rychlost [mm/s]		0,05; 0,1; 0,5; 1,0
Rozlišení snímače [μm]		0,000125
Přítlačná síla snímače [mN]		0,75
Hmotnost [kg]		2,2



Obr. 13 - Měřicí přístroj Surftest SJ 401 [19]

4.2 Optické metody

Další způsobem pro měření drsnosti povrchu je optická metoda. Měření probíhá za pomoci světelného paprsku, který se při měření od povrchu odráží nebo se na něm rozptýlí. Vzájemné působení paprsku s povrchem závisí na měřeném vzorku a jeho vlastnostech a vlastnostech světelného paprsku. Hloubka vnikání paprsku, která závisí na absorpci materiálu a povrchu, má také vliv na výsledek měření. Při měření je třeba dbát na to, že se jedná o nepřímé měření. Proto je nutné získané data srovnat s daty naměřenými dotykovými profilometry. Mezi hlavní výhody optických metod patří, že jsou bezdotykové a nepoškozují kontrolovaný povrch a některými z nich je možné posuzovat současně větší část povrchu.

Výhody optických metod při měření drsnosti povrchu:

- Měřený povrch se nedeformuje
- Průběžná kontrola a možnost řídit kvalitu povrchu
- Možnost opakování měření a rychlý výklad výsledků

Nevýhody optických metod při měření drsnosti povrchu:

- Nepřímé měření drsnosti povrchu
- Složitý výklad naměřených výsledků

4.3 Jiné metody

Pro měření topografie povrchu se užívá mnoho dalších metod, které nemůžeme jednoznačně přiřadit do předcházejících kapitol. Tyto metody se kombinují vzájemně nebo dohromady s uvedenými předchozími metodami pro lepší zjištění výsledků a pro lepší představě o topografii povrchu [20].

Pneumatické komparátory – U tohoto měření se na vzorový a kontrolovaný povrch pokládá měřicí tryska. Mezi tryskou a vrcholy nerovností povrchu vznikají mezery, kterými uniká stlačený vzduch přiváděný tryskou. Rozdíly tlaku nebo průtoku vzduchu se měří manometry nebo průtokoměry. Při větších nerovnostech uniká více vzduchu než při měření menších nerovností a tento rozdíl tlaku ukazuje stupnice [13].

RTG metoda – Při měření se užívají X-paprsky, kterými se ozařuje měřený povrch. Jejich vlnová délka je zhruba stejná jako vzdálenosti atomů v krystalové mřížce.

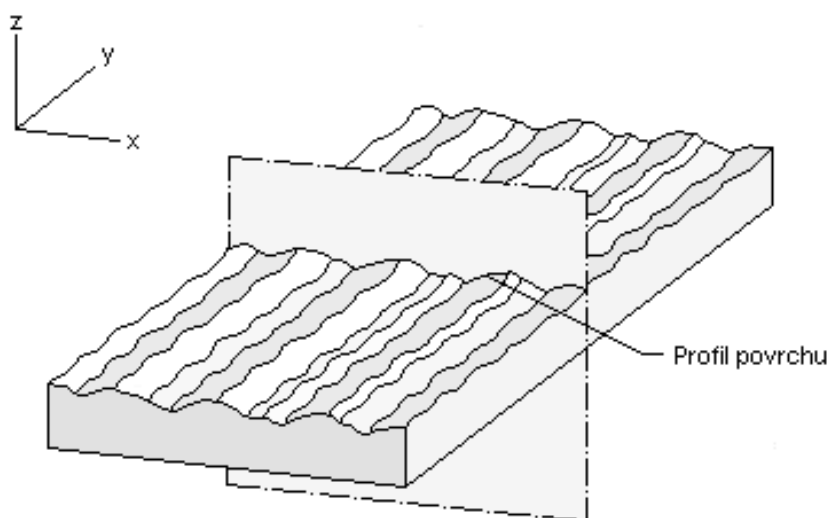
Metoda měření elektronovým mikroskopem – SEM – zjišťování topografie povrchu pomocí elektronového mikroskopu. Povrch součásti se zobrazuje nejčastěji pomocí sekundárně odražených nebo zpětně odražených elektronů, které jsou urychlovány vysokonapětovým elektrostatickým polem.

Měření podle mikroskopie magnetických sil – MFM – Pro dosažení obrazu se využívá magnetické síly vzniklé interakcí mezi zmagnetizovaným povrchem vzorku a zmagnetovaným měřícím hrotem [21].

4.4 Hodnocení topografie povrchu

Výslednou kvalitu, životnost a schopnost plnit svou funkci ovlivňuje u strojírenských součástí několik podmínek. Mezi nejdůležitější z těchto podmínek patří kvalita povrchu, a především její drsnost.

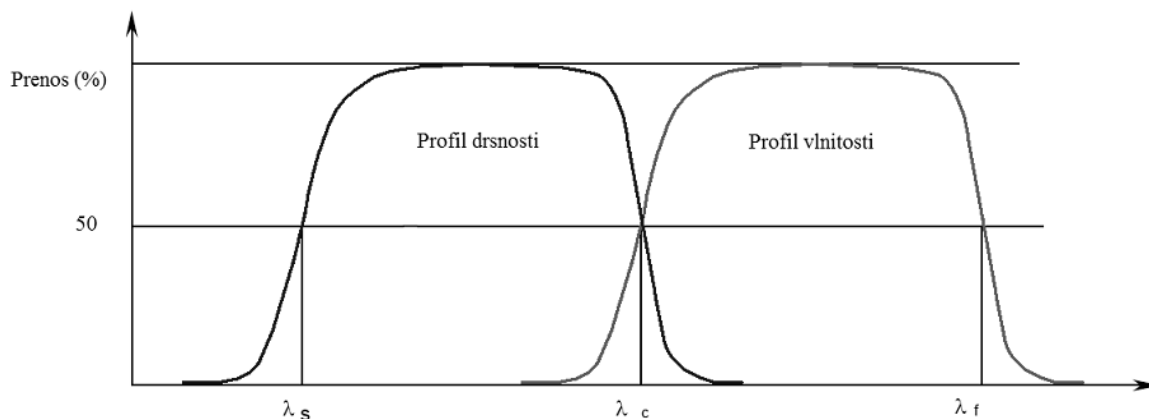
Nerovnosti na povrchu, které vznikají po libovolné technologické operaci, představují prostorový útvar, který se velmi obtížně posuzuje. Problém při hodnocení nerovnosti povrchu (drsnosti) je obvykle řešen redukcí do roviny řezu rovinou, která je kolmá k povrchu (obr. 14). V rovině řezu je získán profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování textury povrchu. Tento profil je složen s jednotlivých složek. Tyto složky jsou profily vlnitosti, drsnosti a kratších a delších složek, které jsou součástí povrchu. Tyto jednotlivé složky se rozdělují pomocí filtrů profilu [22], [23].



Obr. 14 - Profil povrchu [22]

Filtr profilu - filtr, rozdělující profily na krátkovlnné a dlouhovlnné složky [22]

- λ_s *filtry* – filtry definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu;
- λ_c *filtry* – filtry definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti;
- λ_f *filtry* – filtry definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.



Obr. 15 - Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [22]

Základní profil – je základem pro hodnocení parametrů základního profilu (viz obr. 15) [22].

Profil drsnosti – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ; profil je úmyslně pozměněn (viz obr. 15) [22].

Profil vlnitosti – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c , profil je záměrně pozměněn (viz obr. 15) [22].

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry:

R – parametr – parametr vypočítaný z profilu drsnosti

W – parametr – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

P – parametr – parametr vypočítaný ze základního profilu

Definice parametrů profilu povrchu

V normě ČSN EN ISO 4287 jsou přesně definovány parametry určující drsnost povrchu. Těmito parametry lze vyjádřit přesný charakter povrchu. U vzorků byly měřeny a kontrolovány následující parametry drsnosti.

Výškové parametry (výstupky a prohlubně):

Největší výška výstupku profilu – R_p - výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky [22].

Největší výška prohlubně profilu – R_v - hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [22].

Největší výška profilu – R_z – Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [22]:

$$R_z = R_p + R_v \quad (4.1)$$

Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic):

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného povrchu – R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [22]:

$$R_a = \frac{1}{l} * \int_0^l |Z(x)| dx \quad (4.2)$$

Kde $l = l_p$

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu – R_q – kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [22]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} * \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (4.3)$$

Kde $l = l_p$

Špičatost posuzovaného profilu - R_{ku} – podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky [22]:

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^2} * \left[\frac{1}{l_p} * \int_0^{l_p} |Z^4(x)| dx \right] \quad (4.4)$$

5. Experimentální část

V experimentální části bakalářské práce je uveden postup přípravy vzorků technologií laserového řezání a následná analýza a vyhodnocení kvality povrchu řezu při posuzování vlivu použitých technologických parametrů laseru vzhledem k jejich optimalizaci v řezném procesu.

5.1 Příprava vzorků

Vzorky pro experimentální část byly připravovány laserovým řezáním strojem Trumpf TLF 6000 zobrazeném na obr. 16. Jedná se o CO₂ laser. Technické parametry laseru jsou uvedeny v tab. 3. Vzorky byly vytvořeny při technologických parametrech, které jsou uvedeny v tab. 6, v tab. 7 a v tab. 8.



Obr. 16 - Laser Trumpf TLF 6000 kde:

1 – systém vedení laserového paprsku, 2 – laserová hlavice, 3 – pracovní stůl, 4 – laser, 5 – vysokofrekvenční generátor, 6 – řídicí systém, 7 – řízení pracovního stolu, 8 – obslužný pult, 9 – chladicí agregát

Tabulka 3 - Technické parametry laseru Trumpf TLF 6000:

Pracovní prostor	v ose X [mm]	4075
	v ose Y [mm]	1500
	v ose Z [mm]	500
Výkon laseru [W]		6000
Hmotnost [kg]		11500

5.2 Vlastnosti a informace o materiálu vzorků

Pro experiment byl vybrán materiál ČSN 11 375. Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel. Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu je uvedeno tab. 4. V tab. 5 je uvedeno označení jednotlivých vzorků s uvedením jejich materiálu. V tab. 6 až 8 jsou uvedeny technologické parametry přípravy jednotlivých vzorků.

Tabulka 4 - Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 11 375

Chemické složení [%]	Uhlík C	Mangan Mn	Fosfor P	Síra S	Dusík N
	0,17	1,5	0,045	0,045	0,014
Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Minimální nárazová práce KV [J]	Minimální mez kluzu R_e [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost [%]
	210	26	235	360	26

Tabulka 5 - Označení jednotlivých vzorků

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5	Vzorek č. 6
Označení	AC	AE 3,5	AE 3,5 TOO	CB	CB 2 TOO	CD 3,5
Vzorek č.	Vzorek č. 7	Vzorek č. 8	Vzorek č. 9	Vzorek č. 10	Vzorek č. 11	
Označení	CD 3,5	BD 3	BD 3 TOO	BD 4,5	BD 4,5 TOO	

Tabulka 6 - Technologické parametry přípravy vzorků č. 1 – č. 3

Tloušťka materiálu h [mm]	Řezací rychlost v [mm/min]	Výkon P [kW]	Tlak p přidavného plynu [bar]	Průměr dýzy [mm]
5	1800	1100	0,2 – 0,8	1,6

Tabulka 7 - Technologické parametry přípravy vzorků č. 4 – č. 7

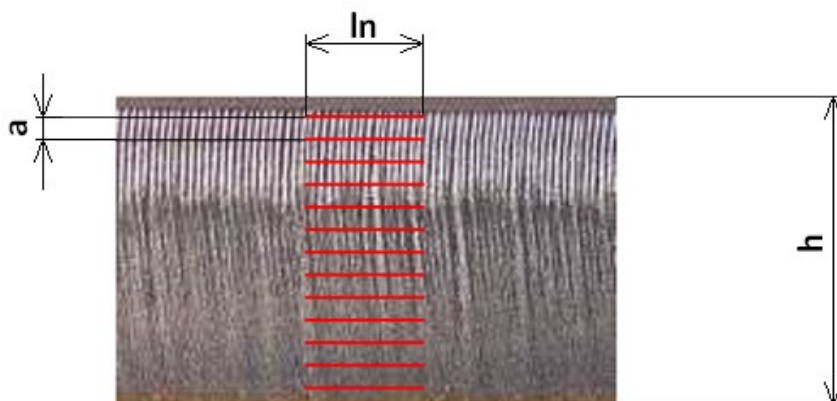
Tloušťka materiálu h [mm]	Řezací rychlost v [mm/min]	Výkon P [kW]	Tlak p přidavného plynu [bar]	Průměr dýzy [mm]
8	1200	1100	0,2 – 0,8	1,6

Tabulka 8 - Technologické parametry přípravy vzorků č. 8 – č. 11

Tloušťka materiálu h [mm]	Řezací rychlost v [mm/min]	Výkon P [kW]	Tlak p přidavného plynu [bar]	Průměr dýzy [mm]
10	900	1350	0,2 – 0,8	1,6

5.3 Popis měření

Měření a kontrola drsnosti povrchu byla prováděna v laboratoři Institutu fyziky VŠB-TU Ostrava. Měřicí přístroj Surftest SJ 401, na kterém bylo měření prováděno, je popsán v kapitole 4.1. Schéma měření je zobrazeno na obr. 17. Vyhodnocovací délka se skládala z pěti základních délek po 0,8 mm, které dohromady dávaly celkovou délku l_p 4 mm. Krok mezi jednotlivými měřenými liniemi a se měnil v závislosti na tloušťce materiálu. Hodnoty vzdálenosti a jsou uvedeny v tab. 9.



Obr. 17 - Schéma měřených linií na vzorku

Tabulka 9 - Vzdálenosti měřících linií podle tloušťky vzorku

Tloušťka materiálu	$h = 5 \text{ mm}$	$h = 8 \text{ mm}$	$h = 10 \text{ mm}$
Krok mezi jednotlivými měřenými liniemi a [mm]	0,4	0,5	0,5

U vzorků dělených technologií laserového řezání byly měřeny parametry drsnosti, a to:

- Největší výška profilu R_z
- Průměrná aritmetická úchylka R_a
- Průměrná kvadratická úchylka R_q
- Špičatost posuzovaného profilu R_{ku}

5.4 Analýza naměřených hodnot

Při vyhodnocování experimentu byly naměřené parametry drsnosti převedeny na závislost na tloušťce materiálu. Vzorky jsem rozdělil do tří skupin podle jejich tloušťky. Každá skupina obsahuje čtyři grafy pro jednotlivé závislosti parametrů drsnosti na tloušťce materiálu. Jde o závislosti:

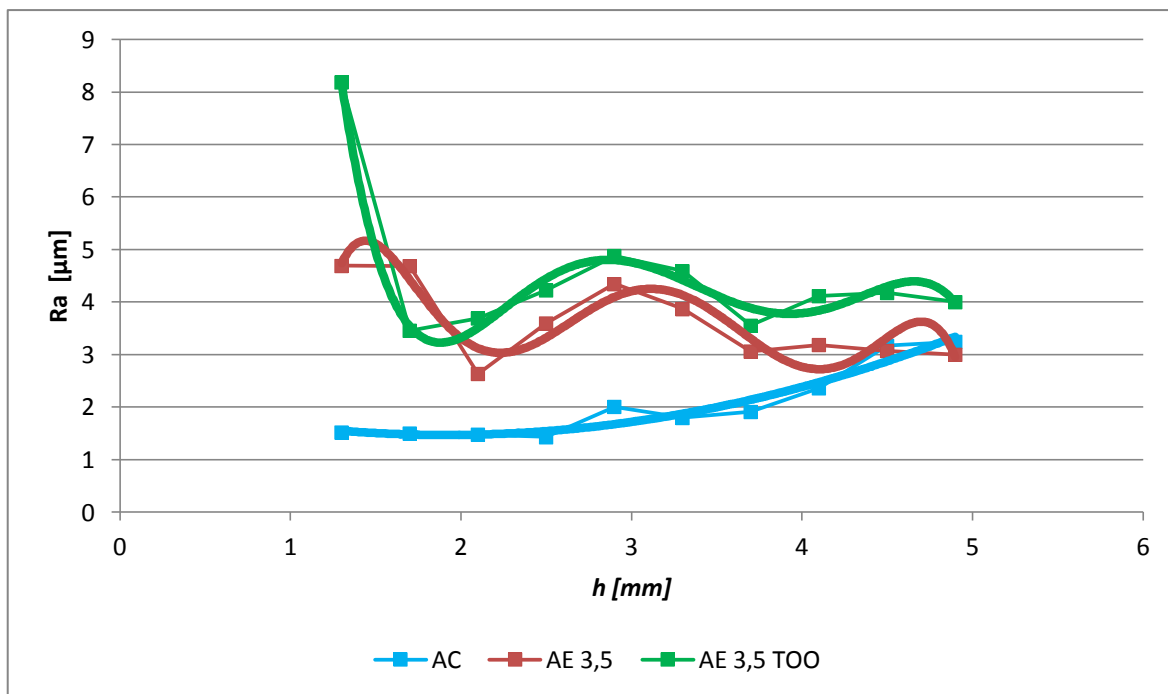
- Závislost průměrné aritmetické úchytky porovnávaného profilu R_a na hloubce řezu h .
- Závislost největší výšky profilu R_z na hloubce řezu h .
- Závislost průměrné kvadratické úchytky posuzovaného profilu R_q na hloubce řezu h .
- Závislost špičatosti posuzovaného profilu R_{ku} na hloubce řezu h .

5.4.1 Tloušťka materiálu 5 milimetrů

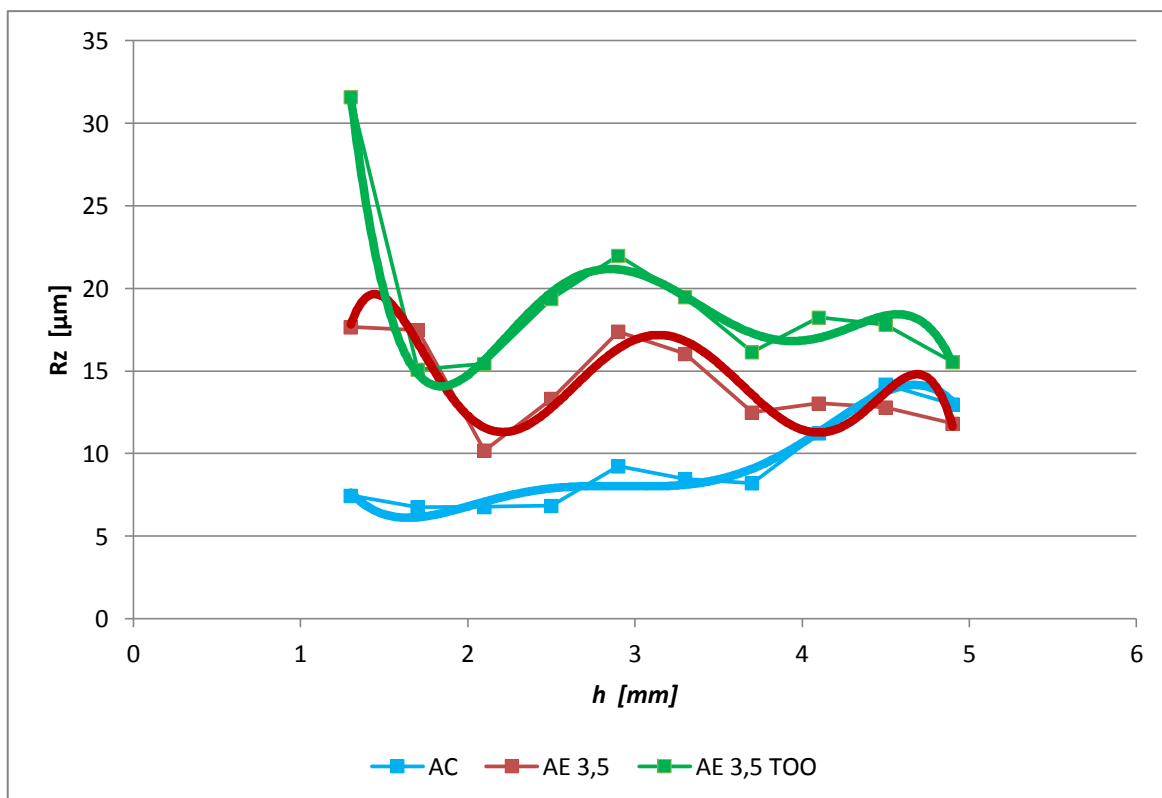
Vzorky tloušťky materiálu pět milimetrů byly tři kusy. Při posuzování se ukázalo, že vzorek č. 1 (AE) měl při měření nejlepší vlastnosti povrchu, kromě parametru R_{ku} , kde naměřené hodnoty projevily značné odchylky. Parametry R_a , R_z a R_q mají poměrně hodně podobný průběh. U parametrů R_a a R_q dokonce i velikosti jednotlivých úchylek pro příslušné místo se neliší o více než jeden mikrometr. Zvětšující se tloušťka materiálu nemá přílišný vliv na změnu velikosti jednotlivých parametrů. Vzorek č. 3 (A 3,5 TOO) má nejhorší kvalitu povrchu, způsobené především velkými úchytkami drsnosti v hloubce 1,3 mm. V tab. 10 jsou uvedeny vzorce pro regresní křivky a jejich spolehlivost. Na obr. 18 až 21 jsou zobrazeny grafy závislostí parametrů drsnosti na tloušťce materiálu.

Tabulka 10 - Rovnice regresních křivek a koeficienty spolehlivosti R^2

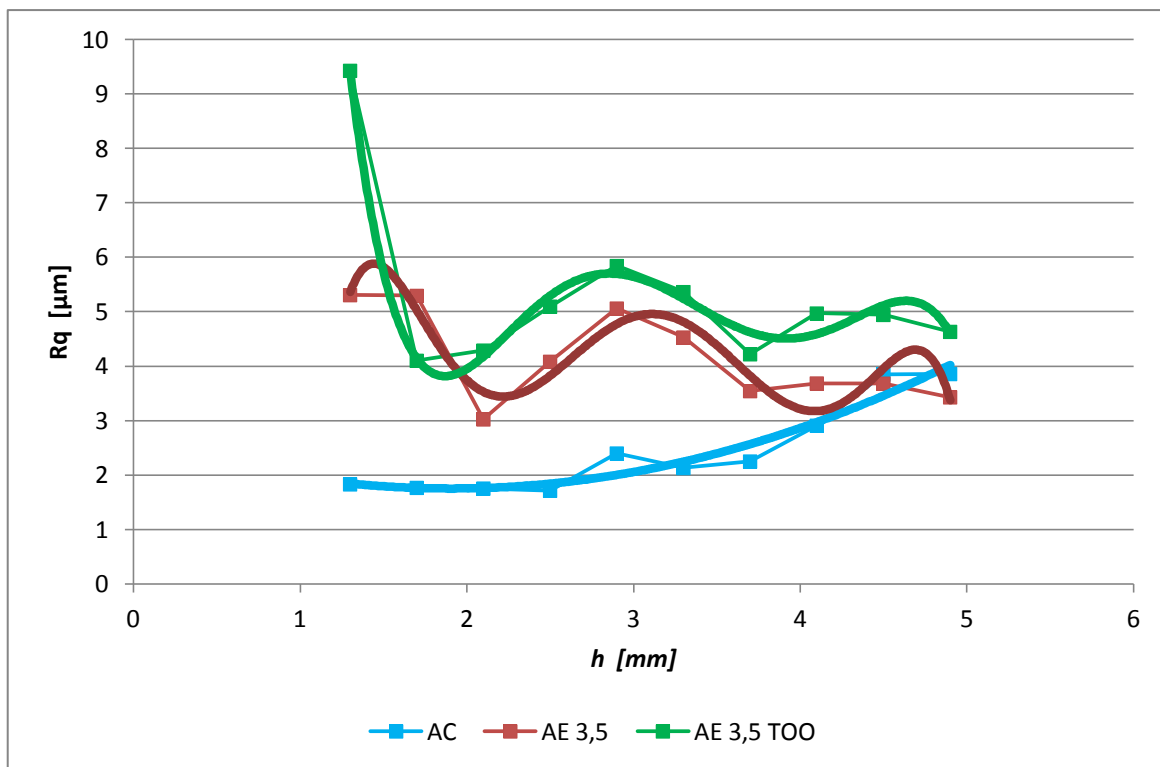
Vzorek	Rovnice regresní křivky	Spolehlivost R^2
AC	$R_a = 0,2096x^2 - 0,8018x + 2,2378$	0,93
	$R_z = -0,6991x^5 + 10,635x^4 - 61,994x^3 + 172,95x^2 - 229,43x + 122,03$	0,9361
	$R_q = 0,253x^2 - 0,9637x + 2,6701$	0,9235
	$R_{ku} = 0,089x^6 - 1,7001x^5 + 13,07x^4 - 51,544x^3 + 109,52x^2 - 118,42x + 53,007$	0,3888
AE 3,5	$R_a = -0,5055x^6 + 9,4561x^5 - 71,018x^4 + 272,73x^3 - 561,8x^2 + 585,08x - 235,44$	0,8301
	$R_z = -2,1189x^6 + 39,613x^5 - 297,36x^4 + 1141,3x^3 - 2349,5x^2 + 2445,6x - 985,92$	0,8513
	$R_q = -0,6167x^6 + 11,507x^5 - 86,202x^4 + 330,25x^3 - 678,77x^2 + 705,63x - 283,94$	0,8433
	$R_{ku} = -0,0401x^6 + 0,7435x^5 - 5,54x^4 + 21,133x^3 - 43,325x^2 + 45,169x - 16,943$	0,9082
AE3,5	$R_a = -0,5497x^5 + 9,1604x^4 - 59,024x^3 + 182,86x^2 - 270,85x + 156,79$	0,9807
	$R_z = -2,2782x^5 + 37,616x^4 - 240,15x^3 + 736,61x^2 - 1078,3x + 617,22$	0,9811
	$R_q = -0,6557x^5 + 10,882x^4 - 69,833x^3 + 215,46x^2 - 317,76x + 183,15$	0,9803
	$R_{ku} = -0,0318x^6 + 0,6011x^5 - 4,6435x^4 + 18,714x^3 - 41,413x^2 + 47,622x - 19,973$	0,6457



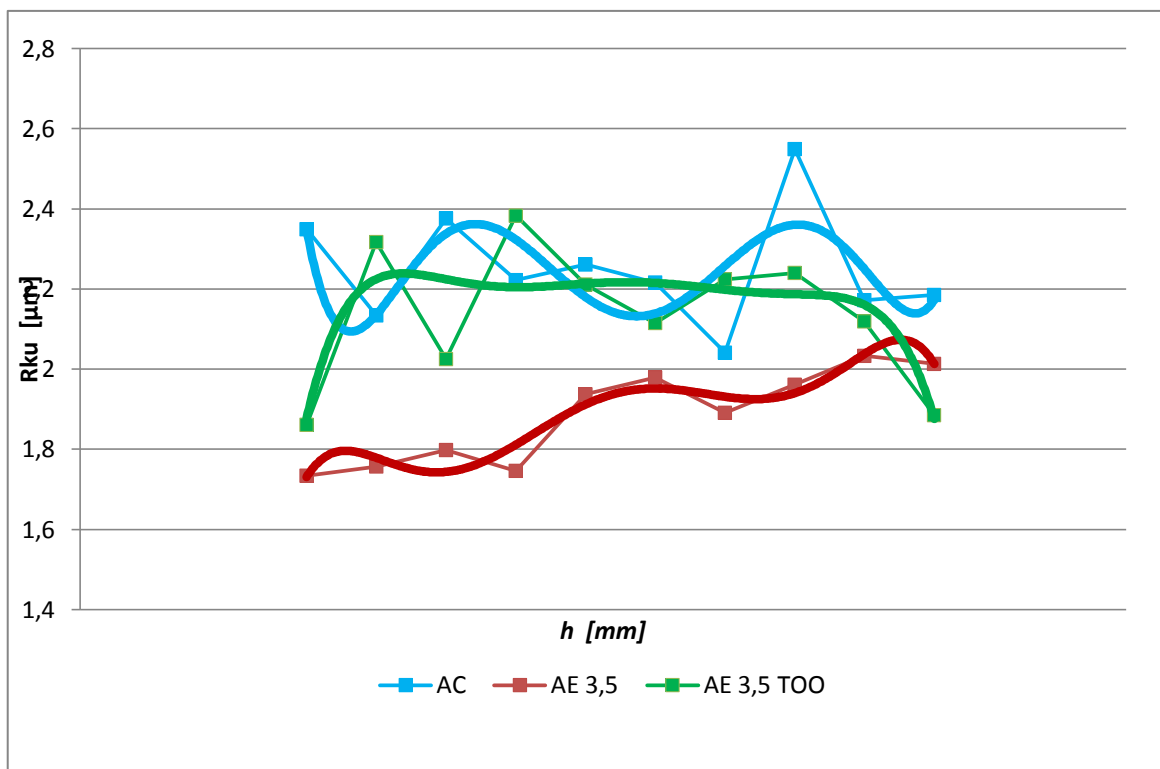
Obr. 18 - Závislost průměrné aritmetické úchyly porovnávaného profilu R_a na hloubce řezu h .



Obr. 19 - Závislost největší výšky profilu R_z na hloubce řezu h .



Obr. 20 - Závislost průměrné kvadratické úchytky posuzovaného profilu R_q na hloubce řezu h .



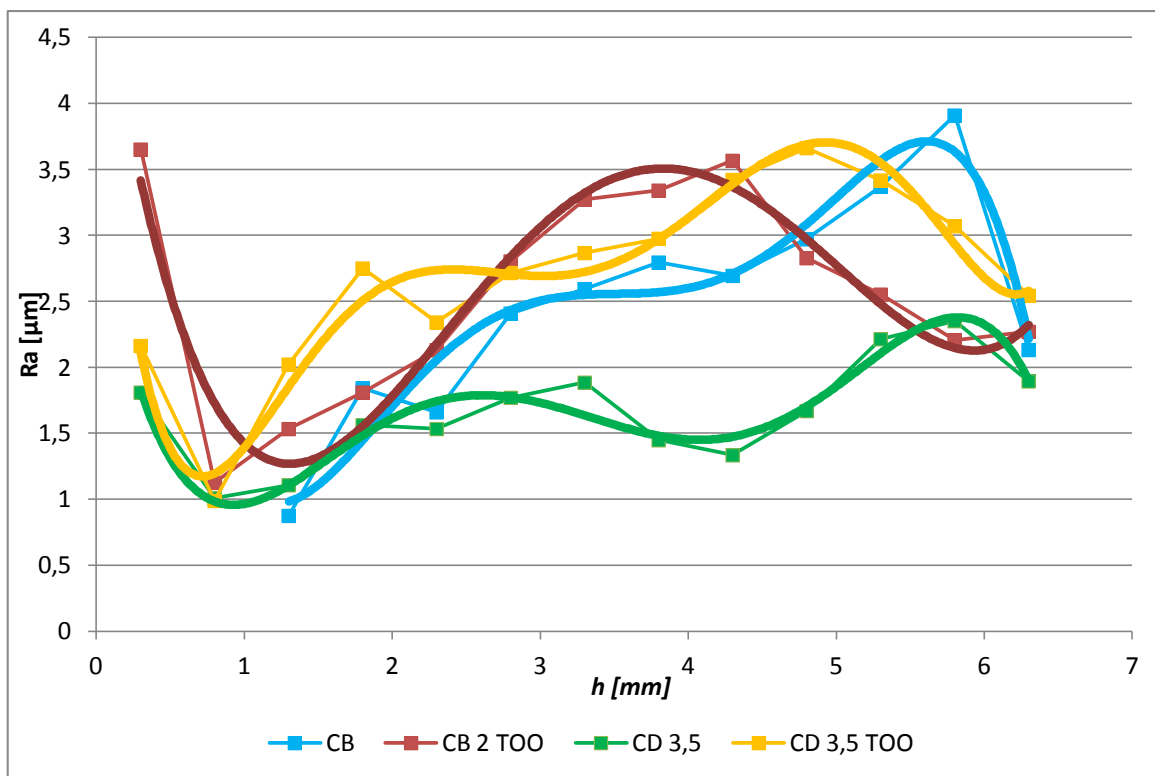
Obr. 21 - Závislost špičatosti posuzovaného profilu R_{ku} na hloubce řezu h .

5.4.2 Tloušťka materiálu 8 mm

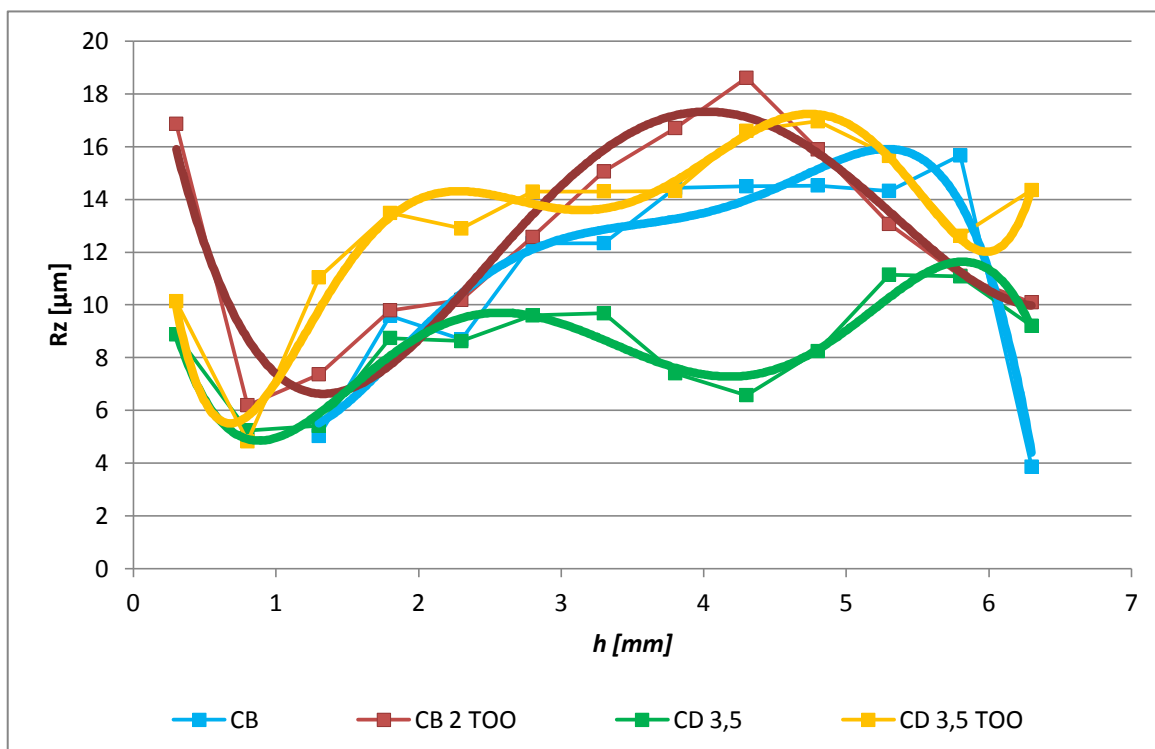
U vzorků tloušťky osm milimetrů se ukázala poměrně velká šíře naměřených hodnot drsnosti. Pouze u vzorku č. 6 (CD 3,5) nebyl rozptyl hodnot příliš vysoký, naopak u vzorku č. 5 (CB 2 TOO) byly naměřené hodnoty velmi kolísavé. U všech vzorků se projevilo mírné zvyšování drsnosti s narůstající tloušťkou, patrné hlavně u vzorku č. 4 (CB2) a č. 7 (CD 3,5 TOO). U špičatosti se ukázala nespolehlivost regresních křivek, ústící z velkého rozptylu naměřených hodnot. Opět se potvrdilo, že hodnoty parametrů R_a a R_q se příliš neliší. V tab. 11 jsou uvedeny vzorce pro regresní křivky a jejich spolehlivost. Na obr. 22 až 25 jsou zobrazeny grafy závislostí parametrů drsnosti na tloušťce materiálu.

Tabulka 11 - Rovnice regresních křivek a koeficienty spolehlivosti R^2

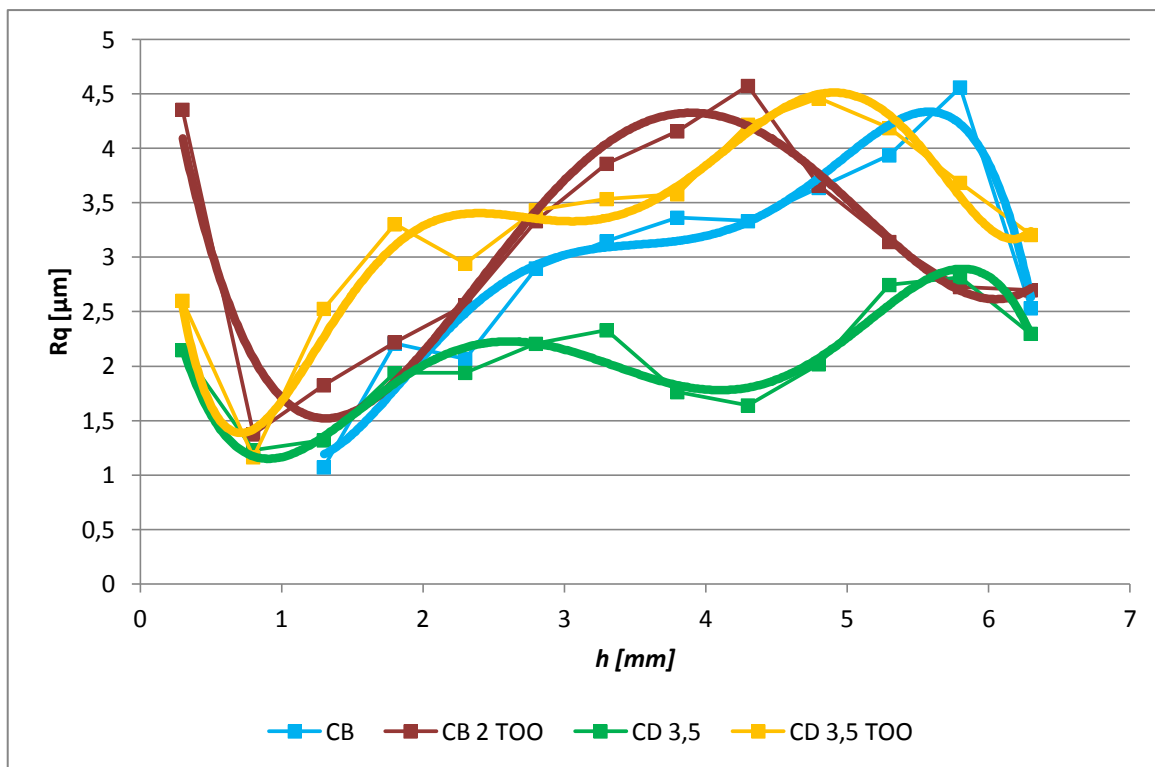
Vzorek	Rovnice regrese křivky	Spolehlivost R^2
CB 2	$R_a = -0,0395x_5 + 0,684x_4 - 4,4282x_3 + 13,126x_2 - 16,829x + 8,6006$	0,9269
	$R_z = -0,1447x_5 + 2,4273x_4 - 15,281x_3 + 43,997x_2 - 53,336x + 27,676$	0,9105
	$R_q = -0,0405x_5 + 0,6977x_4 - 4,4841x_3 + 13,145x_2 - 16,395x + 8,2989$	0,9328
	$R_{ku} = 0,0551x_5 - 0,9731x_4 + 6,4562x_3 - 19,914x_2 + 28,326x - 12,315$	0,9362
CB 2 TOO	$R_a = 0,0623x_4 - 0,9194x_3 + 4,4205x_2 - 7,4033x + 5,264$	0,9126
	$R_z = 0,2241x_4 - 3,5013x_3 + 17,676x_2 - 30,587x + 23,578$	0,9087
	$R_q = 0,0706x_4 - 1,0609x_3 + 5,1799x_2 - 8,7568x + 6,2801$	0,9145
	$R_{ku} = 0,0066x_6 - 0,1311x_5 + 1,002x_4 - 3,6438x_3 + 6,2922x_2 - 4,3235x + 3,0968$	0,6571
CD 3,5	$R_a = -0,022x_5 + 0,369x_4 - 2,2406x_3 + 5,931x_2 - 6,3163x + 3,2434$	0,9193
	$R_z = -0,1181x_5 + 1,9862x_4 - 12,038x_3 + 31,537x_2 - 32,644x + 16,234$	0,8989
	$R_q = -0,0273x_5 + 0,4585x_4 - 2,7805x_3 + 7,33x_2 - 7,7164x + 3,8996$	0,9147
	$R_{ku} = 0,0066x_6 - 0,1153x_5 + 0,7194x_4 - 1,8535x_3 + 1,5889x_2 + 0,2595x + 2,0728$	0,7575
CD 3,5 TOO	$R_a = 0,0135x_6 - 0,2793x_5 + 2,2266x_4 - 8,558x_3 + 16,162x_2 - 12,913x + 4,7412$	0,9417
	$R_z = 0,0835x_6 - 1,6863x_5 + 13,121x_4 - 49,244x_3 + 90,442x_2 - 69,49x + 23,855$	0,9551
	$R_q = 0,0171x_6 - 0,3544x_5 + 2,8212x_4 - 10,831x_3 + 20,416x_2 - 16,234x + 5,8416$	0,949
	$R_{ku} = -0,0011x_6 + 0,0102x_5 + 0,0369x_4 - 0,6355x_3 + 2,0406x_2 - 1,882x + 2,7192$	0,7255



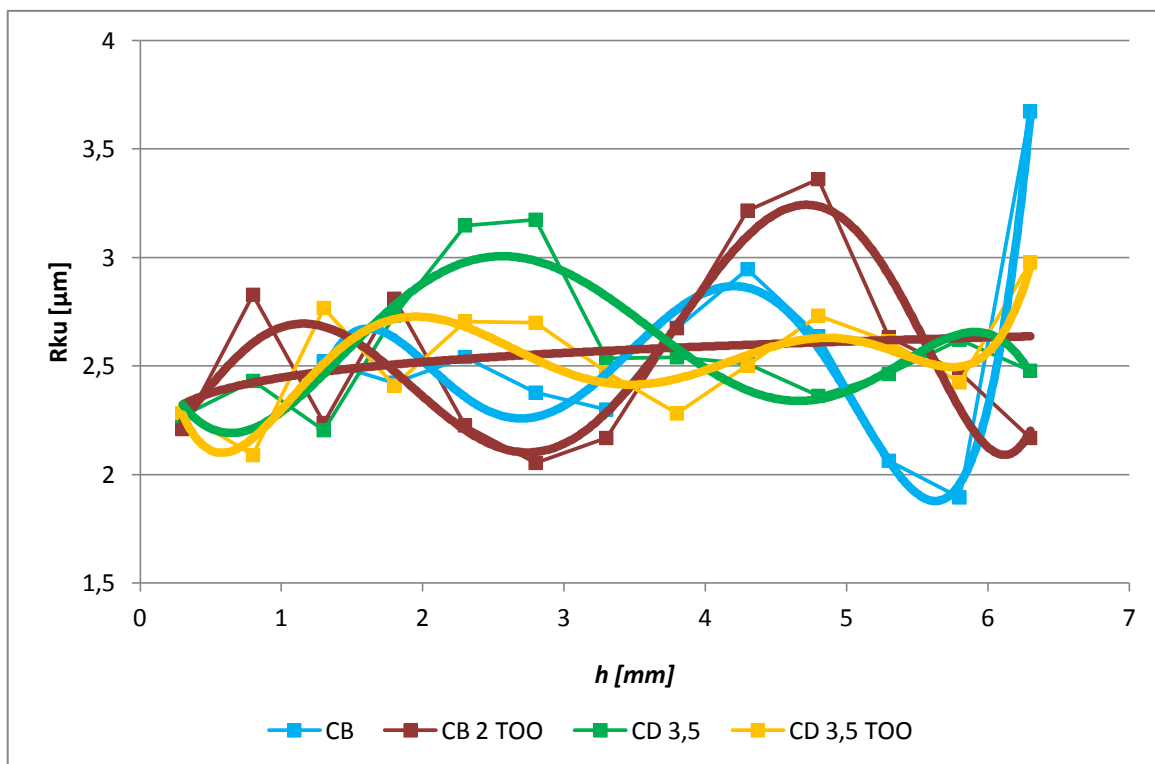
Obr. 22 - Závislost průměrné aritmetické úchytky porovnávaného profilu R_a na hloubce řezu h .



Obr. 23 - Závislost největší výšky profilu R_z na hloubce řezu h .



Obr. 24 - Závislost průměrné kvadratické úchytky posuzovaného profilu R_q na hloubce řezu h .



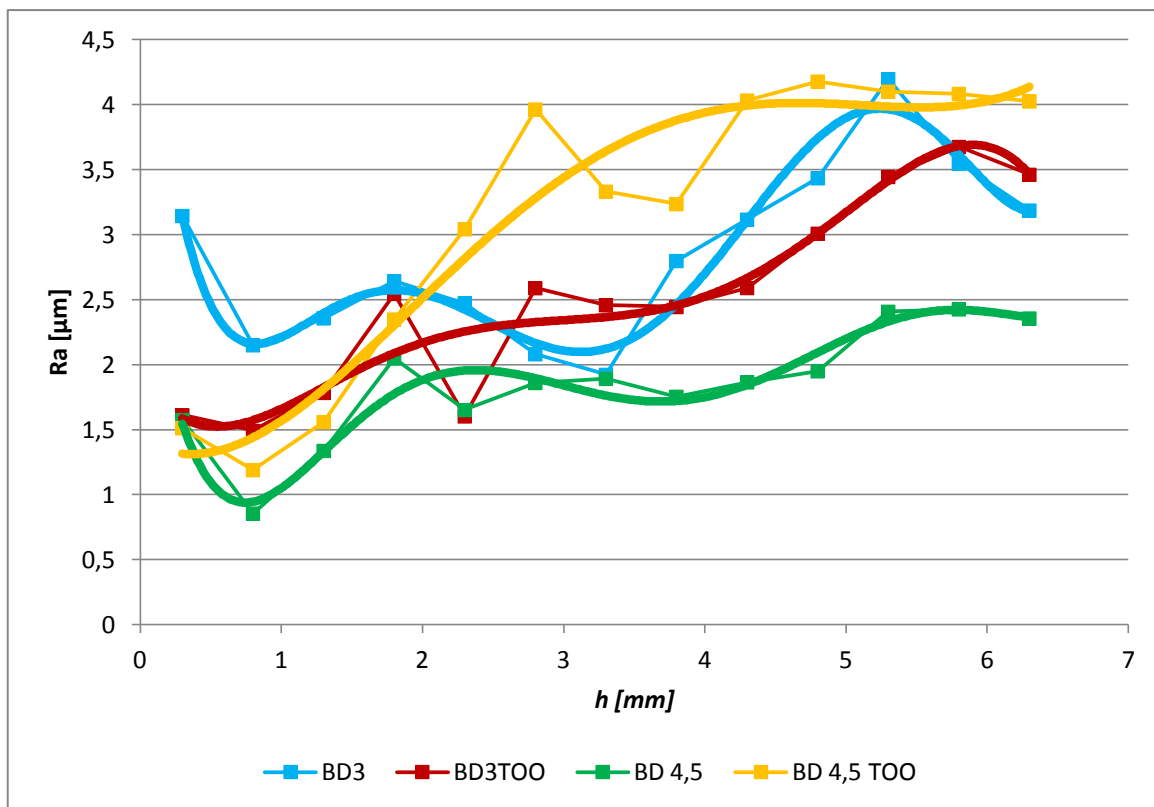
Obr. 25 - Závislost špičatosti posuzovaného profilu R_{ku} na hloubce řezu h .

5.4.3 Tloušťka materiálu 10 mm

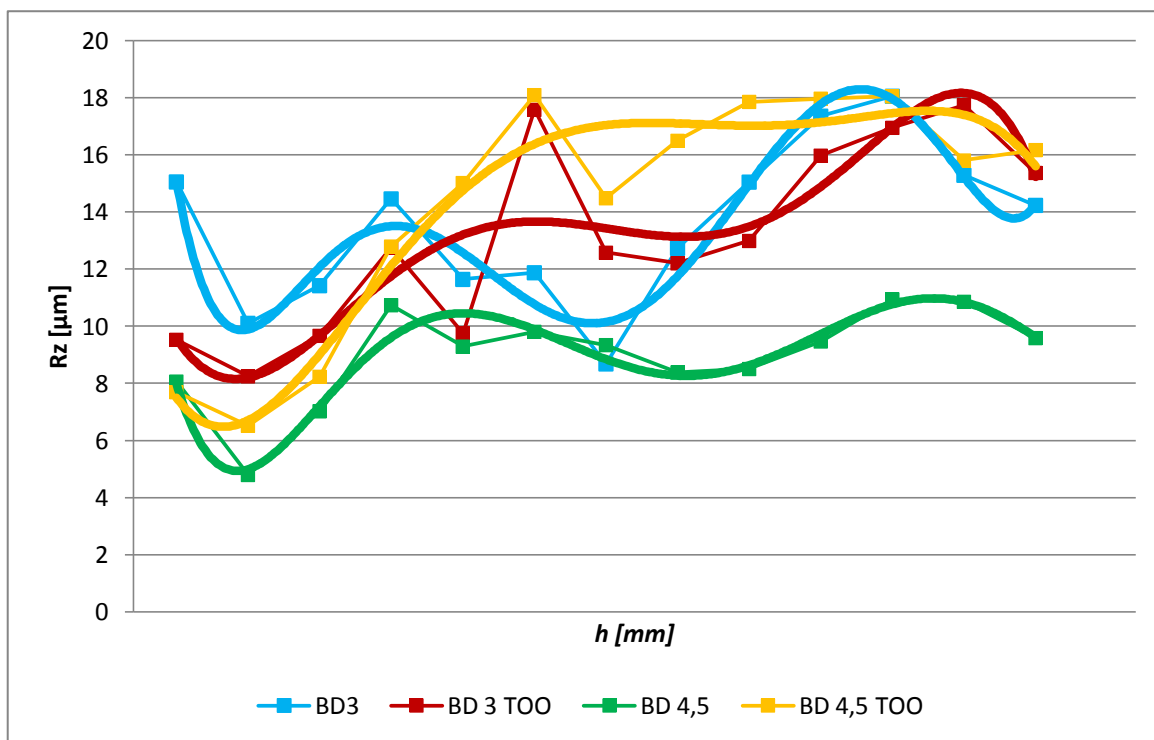
Nejvíce patrné zvyšování drsnosti bylo pozorováno u tloušťky materiálu deset milimetrů. U vzorků č. 9 (BD 3 TOO), č. 10 (BD 4,5) a především u č. 11 (BD 4,5) bylo patrné zvyšování drsnosti s narůstající tloušťkou. Naopak u vzorku č. 8 (BD 3) se objevil velký rozptyl naměřených hodnot. Stejně jako u předchozích tloušťek se u parametru Rku ukázala nespolehlivost měření související s velkým rozptylem naměřených hodnot. V tab. 12 jsou uvedeny vzorce pro regresní křivky a jejich spolehlivost. Na obr. 26 až 29 jsou zobrazeny grafy závislostí parametrů drsnosti na tloušťce materiálu.

Tabulka 12 - Rovnice regresních křivek a koeficienty spolehlivosti R^2

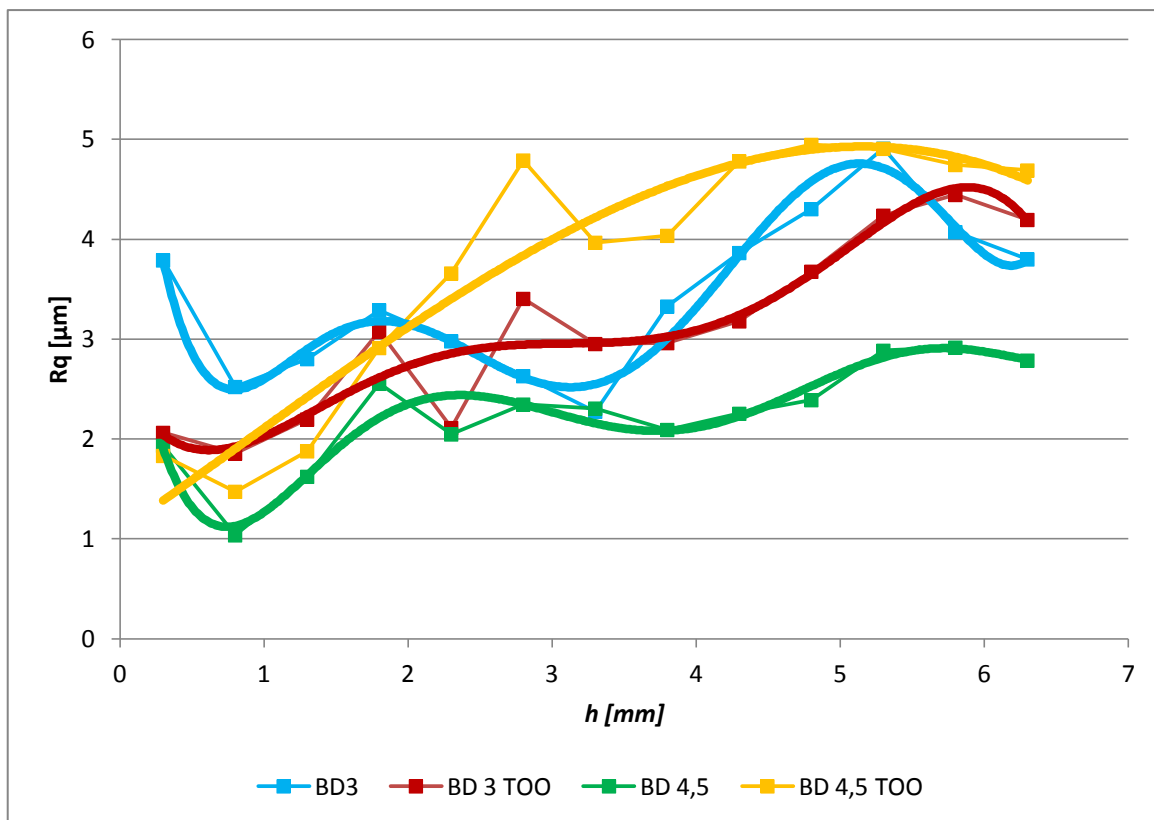
Vzorek	Rovnice regresní křivky	Spolehlivost R^2
BD 3	$Ra = 0,0121x^6 - 0,2515x^5 + 1,9834x^4 - 7,4258x^3 + 13,572x^2 - 11,117x + 5,4362$	0,9396
	$Rz = 0,0825x^6 - 1,6855x^5 + 13,116x^4 - 48,536x^3 + 87,217x^2 - 68,735x + 29,065$	0,9254
	$Rq = 0,0183x^6 - 0,3741x^5 + 2,9149x^4 - 10,804x^3 + 19,534x^2 - 15,706x + 7,0143$	0,9558
	$Rku = 0,0002x^6 - 0,0186x^5 + 0,2936x^4 - 1,8196x^3 + 5,0101x^2 - 5,6283x + 4,623$	0,6085
BD 3 TOO	$Ra = 0,0002x^6 - 0,0135x^5 + 0,1832x^4 - 0,9569x^3 + 2,1593x^2 - 1,6113x + 1,8988$	0,8898
	$Rz = -0,0043x^6 - 0,0055x^5 + 0,8409x^4 - 6,3543x^3 + 17,576x^2 - 16,574x + 13,122$	0,7585
	$Rq = -0,015x^5 + 0,2388x^4 - 1,3465x^3 + 3,2205x^2 - 2,6498x + 2,5807$	0,8907
	$Rku = 0,0002x^6 - 0,0186x^5 + 0,2936x^4 - 1,8196x^3 + 5,0101x^2 - 5,6283x + 4,623$	0,5111
BD 4,5	$Ra = 0,0051x^6 - 0,1171x^5 + 1,0288x^4 - 4,3323x^3 + 8,835x^2 - 7,4712x + 3,1018$	0,9045
	$Rz = 0,0267x^6 - 0,6193x^5 + 5,5004x^4 - 23,309x^3 + 47,432x^2 - 39,599x + 16,191$	0,9111
	$Rq = 0,0067x^6 - 0,153x^5 + 1,3437x^4 - 5,6568x^3 + 11,52x^2 - 9,7176x + 3,9257$	0,9006
	$Rku = 0,0032x^6 - 0,0714x^5 + 0,6151x^4 - 2,5124x^3 + 4,9007x^2 - 3,9779x + 3,435$	0,6329
BD 4,5 TOO	$Ra = 0,0168x^4 - 0,2368x^3 + 0,9911x^2 - 0,6233x + 1,4184$	0,9149
	$Rz = -0,0597x^5 + 1,0532x^4 - 6,7772x^3 + 18,509x^2 - 16,167x + 10,851$	0,925
	$Rq = -0,0183x^3 + 0,0443x^2 + 1,0043x + 1,0798$	0,9009
	$Rku = 0,0005x^6 - 0,0051x^5 - 0,0066x^4 + 0,2162x^3 - 0,8193x^2 + 1,1171x + 2,09$	0,6685



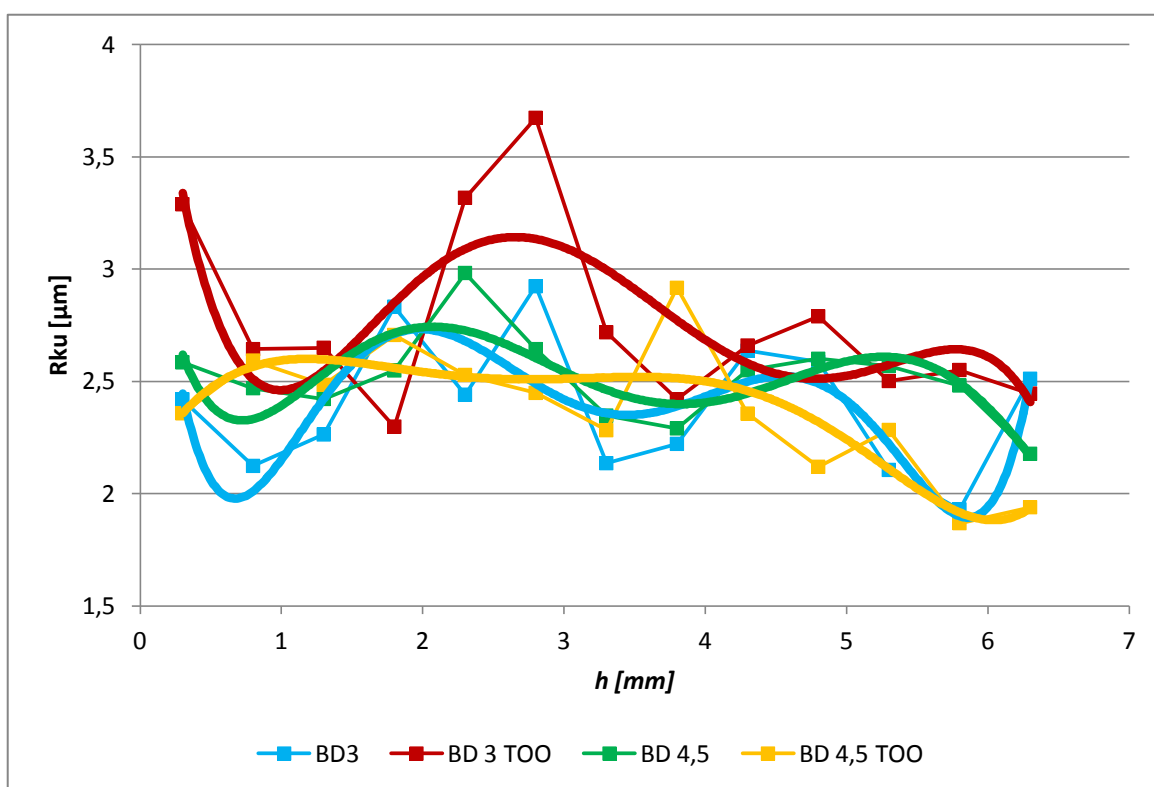
Obr. 26 - Závislost průměrné aritmetické úchytky porovnávaného profilu Ra na hloubce řezu h .



Obr. 27 - Závislost největší výšky profilu Rz na hloubce řezu h .



Obr. 28 - Závislost průměrné kvadratické úchytky posuzovaného profilu R_q na hloubce řezu h .



Obr. 29 - Závislost špičatosti posuzovaného profilu R_{ku} na hloubce řezu h .

5.5 Vyhodnocení a diskuze výsledků:

Při přípravě vzorků se měnily pouze tři technologické parametry. Při pohledu na tyto technologické parametry, které určovaly výslednou kvalitu řezu lze rozpoznat jejich celkový vliv. Nejmenší vliv měl průměr dýzy. Její průměr se při dělení neměnil, a proto její vliv nebyl měřitelný. Tlak přídavného plynu byl rovněž pro všechny tloušťky materiálu ve stejném rozpětí 0,2 – 0,8 MPa a proto také neměl vliv na naměřené hodnoty parametrů drsnosti. Výkon laseru při řezání se pro jednotlivé skupiny vzorků měnil, pro vzorky o tloušťce pět a osm milimetrů byl stejný, pro desetimilimetrové vzorky byl výkon vyšší, avšak pro celkovou drsnost nebyl příliš určující. Největší vliv na výslednou drsnost měla řezací rychlost laseru. Zatímco pro vzorky tloušťky pět milimetrů byla rychlost 1800 milimetrů za minutu, u vzorků desetimilimetrových byla tato rychlost poloviční. Díky tomuto technologickému parametru, který měl na výslednou drsnost největší vliv, měly vzorky všech tloušťek podobné hodnoty měřených parametrů drsnosti, jejichž nejvyšší hodnoty dosahovaly téměř stejných velikostí. Díky tomuto pozorování lze říci, že hlavním určujícím parametrem pro výslednou drsnost měla právě řezná rychlost a její nastavení. Ukázalo se, že pro rostoucí tloušťku materiálu platí použití nižší řezné rychlosti. Při určení závislostí tloušťky materiálu na hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti, se ukázalo, že určování závislosti špičatosti Rku na tloušťce materiálu, se projevilo jako značně nespolehlivé. Tato nespolehlivost je především dána velkým rozptylem naměřených hodnot, a proto parametr Rku a jeho vyhodnocení nelze brát jako příliš přesné.

Návaznost na probranou problematiku

V budoucnu bych rád pokračoval ve studii probírané problematiky. Toto téma má velmi široké použití, které se neustále rozšiřuje. Můj zájem by směřoval do oblastí:

- Výroby většího počtu vzorků s využitím větší rozmanitosti materiálů.
- Měření a analyzování většího počtu parametrů drsnosti.
- Zpracování dat v celkový soubor, pro dosažení co nejlepšího přehledu při použití laserového řezání.
- Na základě analýzy dat odvození zobecněných matematických závislostí.
- Navrhnout způsob analytické optimalizace hlavních technologických parametrů ve vztahu k výkonu a kvalitě laserového dělení.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo porovnávání kvality povrchu vytvořeného laserovým dělením. Technologie dělení laserovým paprskem patří do skupiny nekonvenčních metod obrábění.

V prvních kapitolách bakalářské práce je popsán historický vývoj laseru s uvedenými příklady jeho prvního použití při obrábění ve strojírenství. Dále je popsán současný stav laserového řezání s rozбором možností dnešního řezání materiálů a kromě řezání jsou uvedeny další činnosti, ve kterých se ve strojírenství užívá. V kapitole 3.6 jsou lasery stručně rozděleny podle různých hledisek a podrobněji popsány některé typy laseru, které jsou přiřazeny do skupin podle jejich aktivního prostředí. Následující kapitoly se věnují popsání laserového zařízení a jeho hlavních částí a rozdělení technologických parametrů, které vstupují a ovlivňují laserové řezání.

Při porovnávání topografie povrchu byly použity parametry, zanesené v normě ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288, a to průměrná aritmetická úchylka porovnávaného profilu R_a , největší výška profilu R_z , průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q a špičatost posuzovaného profilu R_{ku} . Tyto parametry byly měřeny na přístroji Talysurf CLI 2000. Jedná se o dotykový profilometr pro přímé měření drsnosti. Tento přístroj byl popsán v kapitole 4.1.

Pro experiment byla vybrána ocel 11375, která se kontrolovala v třech různých tloušťkách materiálu. Naměřené parametry topografie povrchu ukázaly mírné zvyšování drsnosti v závislosti na tloušťce, avšak zvyšování nebylo příliš strmé. U parametru drsnosti R_{ku} se ukázala nespolehlivost naměřených hodnot, zapříčiněná především velkým rozptylem hodnot. Při zadaných technologických parametrech se ukázalo, že tloušťka materiálu nemá přílišný vliv na celkovou drsnost při použití vhodné řezací rychlosti. To ukázalo, že největší vliv na kvalitu povrchu řezu měla řezná rychlost.

Seznam použité literatury

- [1] VRBOVÁ, Miroslava; JELÍNKOVÁ, Helena; GAVRILOV, Petr. Úvod do laserové techniky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. 235 s. ISBN 80-01-01108-9
- [2] MIČIETOVÁ, Anna; MAŇKOVÁ, Ildikó; VELÍŠEK, Karol. Top trendy v obrábění V. část – Fyzikálne technológie obrábania. 2007.
- [3] SALMINEN, Antti. Use of new generation lasers in position cutting [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupný na WWW: <http://www.spinverse.com/pastevents/nmpfinland2008/files/presentations/wednesday_2008-04-16/Salminen_NMPFinland2008.pdf>
- [4] ŠULC, Jan. Lasery a jejich aplikace [online]. 2. Října, 2002, [cit. 2012-04-08]. Dostupný na WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>
- [5] Princip laseru. [online]. [cit. 2012-03-05]. Dostupné na WWW: <<http://lasery.wz.cz/princip.html>>
- [6] PÍŠKA, Miroslav; a kol. Speciální technologie obrábění. Brno: VUT fakulta strojního inženýrství, 2009. 251 s. ISBN 978-80-214-4025-8
- [7] NAVRTÁTIL, Leoš; KOLÁŘOVÁ Hana. Neionizující formy záření [online]. [cit. 2012-04-21]. Dostupný na WWW: <http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch08.htm>
- [8] NOVÁK, Miroslav. Základní princip laseru a jeho dělení [online]. 15. března, 2011, [cit. 2012-04-22]. Dostupný na WWW: <<http://www.lao.cz/serial-princip-a-typy-laseru.htm>>
- [9] NOVÁK, Miroslav. Hlavní typy laseru používaných v průmyslu [online]. 15. března, 2011, [cit. 2012-03-28]. Dostupný na WWW: <<http://www.lao.cz/serial-hlavni-prumyslove-lasery.htm>>
- [10] Rozdělení laserů. Centrum laserových a automatizačních technologií [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupný na WWW: <<http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>>
- [11] ZATLOUKAL, Petr. Laserové dělení materiálu [online]. 10. května, 2007, [cit. 2012-03-28]. Dostupný na WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>
- [12] KOŘÁŇ, Pavel. Laserové řezání [online]. 20. května, 2011, [cit. 2012-03-27]. Dostupný na WWW: <<http://www.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech/serial-laserove-rezani.htm>>
- [13] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠTÁDAL, Bohuslav. Drsnost povrchu. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. 340 s.
- [14] BUMBÁLEK, Leoš; a kol. Kontrola a měření. Praha: Vydavatelství Informatorium, 2009. 208 s. ISBN 978-80-7333-072-9

- [15] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie – část 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 112 s. ISBN 978-80-248-0671-6
- [16] Přístroje na měření tvaru, SURFTEST SJ-400, katalog firmy Mitutoyo [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné na WWW: <[http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/PRC1039\(2\)%20-%20Surftest%20SJ-400.pdf](http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/PRC1039(2)%20-%20Surftest%20SJ-400.pdf)>
- [17] NOVÁK, Zdeněk. PROSTOROVÉ MĚŘENÍ A HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU PŘÍSTROJI TAYLOR HOBSON Ltd [online]. Plzeň, 2007. [cit. 2012-04-15]. Dostupný z WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf>
- [18] Přístroje na měření tvaru, SURFTEST SJ-400, katalog firmy Mitutoyo [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné na WWW: <[http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/PRC1039\(2\)%20-%20Surftest%20SJ-400.pdf](http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/PRC1039(2)%20-%20Surftest%20SJ-400.pdf)>
- [19] Surftest SJ-400 Portable Surface Roughness Tester [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné na WWW: <<http://www.globaltestsupply.com/datasheets/1902SJ400.pdf>>
- [20] VALÍČEK, Jan. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu*. Ostrava, 2007. 115 s. Habilitační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [21] HENDRYCH, A.; KUBÍNEK, R.; VŮJTEK, M. Mikroskopie magnetických sil [online]. Olomouc. [cit. 2012-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://atmilab.upol.cz/texty/SPM-teorie.pdf>>
- [22] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha, 1998. 22 s.
- [23] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha, 1997. 15 s.